



Etude et réalisation d'un système automatique de caractérisation de jets diesel en champ proche et lointain

Jérôme Seneschal

► To cite this version:

Jérôme Seneschal. Etude et réalisation d'un système automatique de caractérisation de jets diesel en champ proche et lointain. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2005. Français. NNT: . tel-00378818

HAL Id: tel-00378818

<https://theses.hal.science/tel-00378818>

Submitted on 27 Apr 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Présentée à

l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne

POUR OBTENIR

le grade de : DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE SAINT ETIENNE
Spécialité : IMAGE

par

Jérôme Seneschal

INGENIEUR CPE LYON

et intitulée

ETUDE ET REALISATION

***D'UN SYSTEME AUTOMATIQUE DE
CARACTERISATION DE JETS DIESEL EN CHAMP
PROCHE ET LOINTAIN***

soutenue ledevant la commission d'examen :

Président :	D. Jeulin	Professeur, CMM ENSMP, Paris.
Rapporteurs :	J.M. Laveste	Professeur, LASMEA, Clermont Ferrand.
	R. Bazile	Maître de Conférences, IMFT, Toulouse.
Directeur :	J.P. Schon	Professeur, UJM, Saint Etienne.
Co-directeur :	J.C. Champoussin	Professeur, ECL, Lyon.
	C. Ducottet	Professeur, UJM, Saint Etienne
Invités :	F. Schmidt	EFS
	P. Gucher	EFS

Table des matières

Table des matières	3
Tables des figures	7
Table de tableaux.....	11
Nomenclature.....	12
Introduction	16
Chapitre 1. Le spray diesel haute pression.....	21
1.1. Injection diesel haute pression.....	21
1.1.1. Inventaire des systèmes	21
1.1.2. L'injecteur diesel Common Rail	23
1.2. Formation du spray	25
1.2.1. Analyse physique du problème	27
1.2.2. Les mécanismes et les modèles de formation du spray.....	29
1.3. Paramètres morphologiques du spray	32
1.3.1. Pénétration.....	33
1.3.2. Angle	33
1.3.3. Volume	33
1.3.4. Richesse.....	34
1.4. Objectifs et Compétences développées.....	35
Chapitre 2. Etat de l'art et revue bibliographique	37
2.1. Bibliographie sur le spray à grand champ	37
2.1.1. Les chambres de pression.....	37
2.1.2. Les montages optiques	41
2.1.3. Mesure des paramètres et lois empiriques.....	43
2.2. Bibliographie sur la caractérisation des gouttelettes.....	46
2.3. Les méthodes de mesure du débit.....	49
2.3.1. Le débitmètre Bosch.....	49
2.3.2. Methode Zeuch.....	49
2.3.3. Déplacement d'un piston.....	50
Chapitre 3. Mise en œuvre expérimentale.....	52
3.1. Définition du cahier des charges du dispositif de diagnostic.....	52
3.2. Conception matérielle.....	53
3.2.1. Générateur de pression	53
3.2.2. Les chambres.....	54
3.2.2.1. La chambre à pression atmosphérique	55
3.2.2.2. La chambre en contre pression.....	56
3.2.3. Banc optique : source lumineuse, caméras, microscope	58
3.2.3.1. Les différentes sources d'éclairage	59
3.2.3.2. Les caméras	59
3.2.3.3. Les microscopes longue distance	60
3.3. Acquisition automatique des images.....	61
3.3.1. Acquisition d'une image	61
3.3.2. Acquisition d'une séquence d'images.....	62
3.4. Les installations complètes de visualisation	64

3.4.1. Installation de visualisation en grand champ	65
3.4.2. Installation de visualisation en petit champ	65
3.4.2.1. Installation pour l'holographie numérique	66
3.4.2.2. Installation pour la visualisation du début et de la fin d'injection	66
Chapitre 4. Le traitement d'images	69
4.1. Méthodes de segmentation d'images.....	69
4.1.1. Bibliographie sur les différentes méthodes de segmentation des jets	70
4.1.2. Etude des différentes méthodes.....	72
4.1.2.1. Seuillage	73
Définition et notations	73
Seuillage par maximisation de l'entropie.....	76
Seuillage par maximisation de la variance interclasse	77
Obtention du contour à partir des images seuillées.....	77
4.1.2.2. Applications des méthodes de seuillage.....	78
4.1.2.3. Détection de contours.....	81
Détection de Canny	82
Détection par divergence de Jensen Shannon	82
4.1.2.4. Application à la détection de contours	86
Détecteur de Canny	86
Jensen Shannon	87
4.1.3. La méthode développée.....	89
4.1.3.1. Choix de la méthode.....	89
4.1.3.2. Adaptation à la segmentation des jets	90
Détection automatique du nez de l'injecteur	90
Labellisation	91
Mesure automatique des paramètres sur les images.....	92
Correction des mesures	93
Sensibilité au niveau de seuil	98
Synoptique complet de l'algorithme	100
4.2. L'holographie numérique	101
4.2.1. Principe de l'holographie numérique	101
4.2.2. Insertion d'un objectif	102
4.2.3. Détection des particules par palpé morphologique	103
4.2.3.1. Transformée VDIP	104
4.2.3.2. Application à la localisation de particules dans les jets	106
Chapitre 5. Validation et Résultats	110
5.1. Mesure des paramètres morphologiques.....	110
5.1.1. Nombre d'images, moyennes	111
5.1.1.1. Détermination du nombre d'images nécessaires	111
5.1.1.2. Comparaison résultats image moyenne et moyenne des mesures.....	114
5.1.2. Evolution des paramètres	117
5.1.2.1. Evolution de la pénétration	119
5.1.2.2. Evolution de l'angle	120
5.1.2.3. Evolution du volume	122
5.1.2.4. Etude de l'influence de la pression et de la contre pression sur un jet.....	123
5.1.3. Les lois empiriques pour la pénétration et l'angle du jet	129
5.1.3.1. Les lois empiriques connues	130
5.1.3.2. Modification de la loi de pénétration de Hiroyasu	134
5.1.4. Etude des écarts type	138

5.1.4.1. Définition de l'écart type.....	138
5.1.4.2. Représentation.....	139
5.1.5. Etude d'une multi injection.....	144
5.1.6. Conclusions.....	148
5.2. Observations et mesures sur les images microscopiques	148
5.2.1. Observations.....	148
5.2.1.1. Observation du début de l'injection.....	149
5.2.1.2. Observation de la fin de l'injection.....	151
5.2.2. Mesures microscopiques.....	154
5.2.2.1. Détection du début de l'injection.....	154
5.2.2.2. Mesure de l'angle microscopique.....	155
5.3. Position 3D des gouttelettes par holographie numérique	157
Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
Publications.....	167
Références bibliographiques.....	169
Annexes.....	181
Annexe 1 : Composant du système Common Rail.....	181
Annexe 2 : Les buses d'injection	187
Annexe 3 : Détermination du coefficient de décharge d'un injecteur	191
Annexe 4 : Caractéristiques des injecteurs utilisés.....	192
Annexe 5 : Propriété et densité de l'huile ISO 4113.....	193
Annexe 6 : Masse volumique de l'azote et du dioxyde de carbone en fonction de la pression et de la température	197
Annexe 7 : Détermination de la viscosité d'un gaz.....	199
Annexe 8 : L'EMI2	200
Annexe 9 : Equation du mouvement relatif d'une particule	203
Annexe 10 : L'holographie.....	205
Annexe 11 : Résultats complémentaires pour la pénétration et l'angle d'ouverture	209
Annexe 12 : Résultats microscopiques.....	227
Annexe 13 : Annexes confidentielles	235

Tables des figures

Figure I- 1 : Historique des standards d'émission européen (Mahr, 2002).....	17
Figure 1-1 : Moteur 4 cylindres avec injecteur en position vertical (1).....	22
Figure 1-2 : Injecteur en position incliné.	23
Figure 1-3 : Schéma de principe d'un injecteur de type Common Rail (Bosch, 1999).	25
Figure 1-4 : Paramètres influençant l'injection.....	26
Figure 1-5 : Etapes de la formation d'un spray (Dumouchel, 1996).....	27
Figure 1-6 : Modèle de ruptures énumérés par Fath et <i>al.</i> , 1997.	30
Figure 1-7 : Modèle de pulvérisation proposé par Baumgarten et <i>al.</i> , 2002.....	31
Figure 1-8 : Modèle du premier break up par Hattori et <i>al.</i> 2004.....	32
Figure 1-9 : Paramètres morphologiques d'un spray.	32
Figure 1-10 : Volume du jet.	34
Figure 2-1 : chambre de Bae et Kang, 2000.....	38
Figure 2-2 : Chambre de Payri.	39
Figure 2-3 : Chambre de Fettes.	40
Figure 2-4 : Ombroscopie.	41
Figure 2-5 : Tomographie.	42
Figure 2-6 : Lumière diffusée par les gouttes.	42
Figure 3-1 : Schéma du montage.....	55
Figure 3-2 : Photographie de la manipulation.....	55
Figure 3-3 : Cellule de visualisation.	56
Figure 3-4 : Montage complet.....	58
Figure 3-5 : Exemple des retards entre le signal de commande électrique de l'électro-injecteur et le signal de la levée d'aiguille ; P_{inj} : 50 MPa, CP : 1 MPa, t_{inj} : 2.5 ms (Baz, 2003).	61
Figure 3-6 : Levée d'aiguille et instant d'acquisition d'images.....	62
Figure 3-7 : Chronogramme pour la prise d'une image.	63
Figure 3-8 : Chronogramme pour la prise d'un doublet d'images.....	63
Figure 3-9 : Synoptique matériel de l'installation.....	64
Figure 3-10 : Montage expérimental chambre sous pression.....	65
Figure 3-11 : Montage expérimental pour l'holographie numérique.....	66
Figure 3-12 : Montage expérimental pour l'ombroscopie.	66
Figure 4-1 : Exemple de détection de contour.	70
Figure 4-2 : (a) Image de synthèse, (b) Image de jet.....	73
Figure 4-3 : Images synthétiques de jet au début de l'injection : (a) $t = 100\mu s$ après SOI, (b) $t = 300\mu s$ après SOI.....	73
Figure 4-4 : Définition du seuillage, (a) image à niveau de gris, (b) histogramme de l'image à niveau de gris, (c) image seuillée (A noter, 0 correspond aux pixels noirs et 255 aux pixels blancs).	74
Figure 4-5 : Extraction du contours par morphologie mathématique. En vert dilaté carré de la forme, croix : suppression des point pour obtenir l'érodé croix du dilaté, rond : point appartenant aux contours de la forme.	78
Figure 4-6 : Détection des contours sur les images synthétique, (a) seuillage par maximisation de l'entropie sur début d'injection synthétique ($t = 100 \mu s$ après SOI), (b) seuillage par maximisation de la variance interclasse sur début d'injection synthétique ($t = 100 \mu s$ après SOI), (c) seuillage par maximisation de l'entropie sur injection développée synthétique ($t = 1000 \mu s$ après SOI), (d) seuillage par maximisation de la variance interclasse sur injection développée synthétique ($t = 1000 \mu s$ après SOI).	79
Figure 4-7 : Comparaison des deux seuillages (noir seuillage par maximisation de l'entropique, blanc seuillage par maximisation de la variance interclasse).	80

Figure 4-8 : Détection du contours par seuillage (a) par maximisation de l'entropique, (b) par maximisation de la variance interclasse, sur l'image réelle.	80
Figure 4-9 : Signal monodimensionnel et ses dérivées première et seconde.	81
Figure 4-10 : Fenêtre glissant sur un ligne droite séparant deux régions.	83
Figure 4-11 : Détection de contours par la méthode de Canny sur les images synthétiques (a) $\sigma = 2$, (b) $\sigma = 3$	86
Figure 4-12 : Détection de contours par la méthode de Canny sur l'image réelle (a) $\sigma = 1$, (b) $\sigma = 4$	87
Figure 4-13 : Détection de contours par la méthode de Jensen Shannon sur l'image synthétique.	88
Figure 4-14 : Détection de contours par la méthode de Jensen Shannon sur l'image réelle.	88
Figure 4-15 : Détection automatique du nez.	91
Figure 4-16 : Schéma de labellisation.	91
Figure 4-17 : Labellisation des jets.	91
Figure 4-18 : Exemple de traitement complet, (a) image de base, (b) seuillage par maximisation de la variance interclasse, (c) détection de contour par morphologie mathématique, (d) mesure des paramètres (pénétration et angle).	93
Figure 4-19 : Pénétration et angle de projection.	94
Figure 4-20 : Position des trous sur les injecteurs utilisé : (a) injecteur 1, (b) injecteur 2.	94
Figure 4-21 : Projection de l'angle du jet.	95
Figure 4-22 : Banc de mesure pour la vérification de la correction de l'angle.	96
Figure 4-23 : Angle 40° avec une inclinaison de 20° par rapport à l'axe de l'injecteur.	96
Figure 4-24 : Angle 40° avec une inclinaison de 40° par rapport à l'axe de l'injecteur.	96
Figure 4-25 : Mesure de la pénétration du spray en fonction du niveau de seuil.	98
Figure 4-26 : Mesure de l'angle du spray en fonction du niveau de seuil.	98
Figure 4-27 : Mesure du volume du spray en fonction du niveau de seuil.	99
Figure 4-28 : Organigramme du traitement d'image appliqué.	100
Figure 4-29 : Principe de restitution d'un hologramme.	102
Figure 4-30 : Illustration de l'effet d'un objectif standard introduit dans un dispositif d'holographie en ligne.	103
Figure 4-31 : Principe de segmentation des particules d'une tranche du volume reconstruit.	104
Figure 4-32 : Images reconstruites et profils correspondants d'une particule placée à 50 mm du capteur, selon l'axe (z) (a) $z = 47$ mm, (b) $z = 47.5$ mm, (c) $z = 48$ mm, (d) $z = 48.5$ mm, (e) $z = 49$ mm, (f) $z = 49.5$ mm, (g) $z = 50$ mm.	105
Figure 4-33 : Principe de la transformée VDIP.	105
Figure 4-34 : Palpeurs cylindriques utilisés pour la détection de particules focalisées.	106
Figure 4-35 : (a) extrait d'un hologramme simulé de 1000 particules (512*512 pixels), (b) exemple de plan restitué (512*512 pixels).	107
Figure 4-36 : Résultats de segmentation par palpation d'un même ensemble de particules à partir de deux plans restitués différents : (a) plan reconstruit à $z=44$ mm contenant les particules focalisées, (b) résultat de segmentation avec les erreurs en rouge, (c) plan reconstruit à $z=41$ mm du capteur contenant les mêmes particules défocalisées, (d) résultat de segmentation.	108
Figure 5-1 : Visualisation de l'erreur relative.	111
Figure 5-2 : Erreur relative en fonction du nombre d'images utilisées.	112
Figure 5-3 : Erreur en %, sur la pénétration des jets à 1100 μ s après SOI.	113
Figure 5-4 : Erreur en %, sur l'angle des jets à 1100 μ s après SOI.	113
Figure 5-5 : Erreur en %, sur le volume des jets à 1100 μ s après SOI.	114
Figure 5-6 : Comparaison entre : mesure sur image moyenne et moyenne des images pour la pénétration (Injecteur 1, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5MPa).	115

Figure 5-7 : Comparaison entre : mesure sur image moyenne et moyenne des images pour l'angle (Injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5MPa).	116
Figure 5-8 : Comparaison entre : mesure sur image moyenne et moyenne des images pour la volume (Injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5MPa).	117
Figure 5-9 : Cartographie de l'injecteur 1 pour une contre pression de 2.5 MPa.	118
Figure 5-10 : Evolution de la pénétration des jets, injecteur 1, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.	119
Figure 5-11 : Evolution de la pénétration des jets, injecteur 2, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.	119
Figure 5-12 : Evolution de l'angle des jets, injecteur 1, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.	120
Figure 5-13 : Evolution de l'angle des jets, injecteur 2, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.	121
Figure 5-14 : Evolution du volume des jets, injecteur 1, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.	122
Figure 5-15 : Evolution du volume des jets, injecteur 2, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.	122
Figure 5-16 : Evolution de la pénétration du jet 2 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.	123
Figure 5-17 : Evolution de la pénétration du jet 5 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pression.	124
Figure 5-18 : Evolution de la pénétration du jet 1 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.	124
Figure 5-19 : Evolution de la pénétration du jet 3 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.	125
Figure 5-20 : Evolution de l'angle du jet 2 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.	126
Figure 5-21 : Evolution de l'angle du jet 5 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.	126
Figure 5-22 : Evolution de l'angle du jet 1 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pression.	127
Figure 5-23 : Evolution de l'angle due jet 3 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.	127
Figure 5-24 : Evolution de la richesse pour l'injecteur 1 à différentes pressions d'injection et contre pressions.	128
Figure 5-25 : Evolution de la richesse pour l'injecteur 2 à différentes pressions d'injection et contre pressions.	129
Figure 5-26 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu et Dent pour un injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).	130
Figure 5-27 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu et Dent pour un injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).	131
Figure 5-28 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).	132
Figure 5-29 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).	132
Figure 5-30 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).	133
Figure 5-31 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).	133
Figure 5-32 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu modifiée pour l'injecteur 1 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).	137
Figure 5-33 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu modifiée pour l'injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).	137
Figure 5-34 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu modifiée pour l'injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).	138
Figure 5-35 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.	139

Figure 5-36 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 1, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.	140
Figure 5-37 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.	140
Figure 5-38 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.	141
Figure 5-39 : Image d'injection (injecteur 2) prise au même instant après SOI pour trois injections successives.	141
Figure 5-40 : Angle moyen et écart type, injecteur 1, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.	142
Figure 5-41 : Angle moyen et écart type, injecteur 1, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.	143
Figure 5-42 : Angle moyen et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.	143
Figure 5-43 : Angle moyen et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.	144
Figure 5-44 : Visualisation d'une multi injection.	145
Figure 5-45 : Evolution de la pénétration pour la multi injection.	145
Figure 5-46 : Evolution de la pénétration moyenne et de l'écart type pour la multi injection.	146
Figure 5-47 : Evolution de l'angle moyen pour la multi injection.	146
Figure 5-48 : Evolution de l'angle moyen et de l'écart type pour la multi injection.	147
Figure 5-49 : Volume moyen pour la multi injection.	147
Figure 5-50 : Observation de la forme d'ombrelle (P_{inj} : 120 MPa, CP : 0 MPa).	149
Figure 5-51 : Observation de la forme d'ombrelle (P_{inj} : 120 MPa, CP : 2 MPa).	150
Figure 5-52 : Formation de ligaments aux bords du jet à pression atmosphérique.	150
Figure 5-53 : Début d'injection pour un injecteur multi trou (P_{inj} : 80 MPa, CP : 0 MPa).	150
Figure 5-54 : Début d'injection pour un injecteur multi trou (P_{inj} : 80 MPa, CP : 1 MPa).	151
Figure 5-55 : Fin d'injection pour l'injecteur mono trou (P_{inj} : 120 MPa, CP : 0 MPa).	152
Figure 5-56 : Fin d'injection pour l'injecteur mono trou (P_{inj} : 120 MPa, CP : 2 MPa).	152
Figure 5-57 : Fin d'injection pour l'injecteur multi trou à pression atmosphérique (P_{inj} : 80 MPa, CP : 0 MPa).	152
Figure 5-58 : Fin d'injection pour l'injecteur multi trou à haute pression (P_{inj} : 120 MPa, CP : 0 MPa).	153
Figure 5-59 : Image de fond : sans injection.	155
Figure 5-60 : (a) Image de série sans jet, (b) soustraction avec le fond Figure 5-59, (c) seuillage de (b).	155
Figure 5-61 : (a) Image de série avec jet, (b) soustraction avec le fond Figure 5-59, (c) seuillage de (b).	155
Figure 5-62 : Injection microscopique.	156
Figure 5-63 : Angle microscopique.	157
Figure 5-64 : Position de l'hologramme dans le jet global.	158
Figure 5-65 : Exemple hologramme en bord de jet.	158
Figure 5-66 : Extraction d'une fenêtre d'un plan restitué à la distance $Z=37$ mm.	159
Figure 5-67 : Champ 3D reconstruit de particules situées en bordure du jet haute-pression.	159
Figure C- 1 : Synoptique de l'algorithme de traitement d'images.	
Erreur ! Signet non défini.	
Figure C- 2 : Nouvelle mesure d'angle.	166

Table de tableaux

Tableau 2-1 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes de mesure de taille de gouttes (Anezaki et <i>al.</i> , 2002).	48
Tableau 4-1 : Comparaison des différentes méthodes de traitement d'images.	89
Tableau 4-2 : Positionnement des angles.	96
Tableau 4-3 : Résultats de la correction de la pénétration.	97
Tableau 4-4 : Résultats de la correction de l'angle.	97
Tableau 5-1 : Paramètres expérimentaux.	110
Tableau 5-2 : Prédiction de l'angle par Hiroyasu et Reitz (température gaz 60°C).....	131
Tableau 5-3 : Paramètres d'injection.	145
Tableau 5-4 : Paramètres de l'injecteur multi trou et mono trou.	148
Tableau C- 1 : Comparaison des différentes méthodes de traitement d'images.	

Erreur ! Signet non défini.

Nomenclature

Abbreviations

CO	Monoxyde de carbone;
CO ₂	dioxyde de carbone;
HC	Composé hydro carboné;
N ₂	Diazote;
NO _x	Termes regroupant le monoxyde et le dioxyde d'azote;
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques;
CCD	Charged Couple Device;
PDPA	Phase Doppler Particule Analyser;
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation;
MIQ	Mono Injector Qualifier;
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer;
PLL	Phase Locked Loop;
PWM	Pulse Width Modulation;
TTL	Transistor Transistor Logic (0-5 V);
HCCI	Homogenous Charge Compression Ignition;
CR	Common Rail (Rampe Commune);
VCO	Valve Covered Orifice;
FFD	First Frame Delay;
ICS	Injection Control Signal (signal d'injection);
NOTD	Needle Opening Time Delay;
SOA	Start Of Acquisition;
SOI	Start Of Injection (instant où la première goutte apparaît);
SFD	Second Frame Delay;
VDIP	Virtual Double-sided Image Probing;

Notations latines

A	surface du jet (en m ²);
A_n	surface du trou d'injection (en m ²);
A_{tube}	section intérieure du tube (débitmètre Bosch) (en m ²);
B	module de Bulk du liquide;
C_d	coefficient de décharge;
CP	contre pression (en MPa);
c_{son}	vitesse du son dans le liquide (en m/s);
d_{inj}	diamètre de l'injecteur (en m);
d_{sac}	diamètre du sac de l'injecteur (en m);
dt	incrément de temps (en μs);
d_v	diamètre des disques pour l'expression du volume du jet (en m);

dV/dt	débit instantané (en m ³ /s)
E	erreur absolue;
Er	erreur relative;
F	force de traînée;
K	Kelvin ;
K_c	nombre de cavitation;
$l_{breakup}$	longueur du jet à l'instant de break up (en m);
l_{inj}	longueur du trou d'injection (en m);
\dot{m}_i	masse injectée à travers le nez (en mg);
M_{air}	masse d'air entraîné dans le jet (en mg);
M_{fuel}	masse de fuel injecté (en mg);
M_{totale}	masse totale injectée dans le cas d'un injecteur multi trou (en mg);
N	nombre d'incrément de temps;
n	nombre d'images par série;
nb_{trous}	nombre de trou d'un injecteur multi trou;
p	pixel ;
P_{inj}	pression d'injection (en MPa);
P_s	pression sac en amont (en MPa);
P_v	pression de vapeur saturante (en MPa);
Re	nombre de Reynolds;
S	longueur de pénétration (en m);
t	temps (en s);
$t_{breakup}$	instant de break up (en s);
T_g	température du gaz (en °K);
T_l	température de l'huile (en °K);
$u_{breakup}$	vitesse du jet dans le corps liquide (en m/s);
u_i	vitesse du fluide (en m/s);
U	vitesse du liquide (en m/s);
v	vitesse moyenne dans le conduit (en m/s);
V_{air}	volume d'air entraîné dans le jet (en mm ³);
V_{fuel}	volume de fuel injecté (en mm ³);
V_{total}	volume total injectée dans le cas d'un injecteur multi trou (en mm ³);
We	nombre de Weber;

Notations grecques

α	angle inter jet (en radian);
α_c	constante;
ΔP_l	différence entre la pression d'injection et la pression dans la chambre (en Pa);
Δx	hauteur du cylindre pour l'expression du volume du jet (en m);
ε	hauteur de rugosité (en m);
λ	angle du jet par rapport à l'axe de l'injecteur (en radian);
λ_o	longueur d'onde (en nm);

θ_d	angle du spray (exprimé en degré);
θ_r	angle du spray (exprimé en radian);
μ_g	viscosité dynamique du gaz présent dans la chambre (en Pa s);
ν	viscosité cinématique (en m ² /s);
ν_m	viscosité du gaz autour de la particule (en m ² /s);
ρ	masse volumique (en kg/m ³);
ρ_g	masse volumique du gaz dans la chambre (en kg/m ³);
ρ_l	masse volumique du fluide injecté (en kg/m ³);
ρ_v	masse volumique du fluide vapeur (en kg/m ³);
σ_l	tension superficielle;
ϕ	richesse;

Introduction

Ce travail de recherche a été mené dans le cadre d'un projet innovant initié par la société EFS (Montagny, 69) en collaboration avec l'équipe IMAGE (Image, Modèle, Architecture, Géométrie) du laboratoire LTSI (Laboratoire de Traitement du Signal et d'Instrumentation) de l'Université Jean Monnet de Saint Etienne et l'équipe Diphasique du LMFA (Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique) de l'Ecole Centrale de Lyon.

D'une part, la société EFS experte dans la mesure des débits d'injection depuis 15 ans, souhaite par cette thèse élargir son offre de produits dans le domaine de l'injection en proposant un système automatique de diagnostic optique des jets diesel par imagerie. D'autre part, au plan physique, ce système doit permettre d'améliorer les connaissances concernant l'injection haute pression.

Contexte économique et sociétal

Le marché des voitures diesel a explosé ces dernières années, mais hélas la pollution induite aussi. Les enjeux de ce travail s'inscrivent dans la maîtrise de la combustion diesel, afin de permettre une réduction des émissions règlementées que sont les NO_x (terme regroupant le monoxyde et le dioxyde d'azote), ce que l'on appelle d'une façon générale les « particules », le CO (monoxyde de carbone) et les HC (composés hydro carboné), mais aussi non règlementées telles que le CO_2 (dioxyde de carbone), HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), aldéhydes.

Depuis une trentaine d'année, les pouvoirs publics, et les industriels concernés, ont adopté une démarche privilégiant la réduction de la pollution d'origine automobile. Ainsi depuis le choc pétrolier de 1973, la consommation moyenne des voitures neuves a diminué de plus de 20 % (source CCFA (Comité des Constructeurs Français d'Automobiles)). Au niveau des rejets de CO_2 , le parc dégage aujourd'hui une moyenne de 150 grammes par kilomètre, contre 20 % de plus pour l'essence. L'Europe s'étant engagé à ramener les émissions totales sous la barre des 140 g/km grâce à la diésélisation de la flotte, qui a capté 47 % des ventes de véhicules neufs, les industriels ont su respecter la pente de réduction promise en passant de 185 à 160 g/km en sept ans. Le pari de diviser par cinq en 2020 le niveau de 1995 est cependant menacé par la stabilisation de ces parts de marché, d'autant que la masse des véhicules ne cesse de grimper (environ 15 kg par an) de part la surenchère des équipements de bord (climatisation, isolant acoustique, coussins gonflable...). La Figure I- 1 montre la réduction des principaux polluants automobiles au cours des vingt dernières années et les objectifs à atteindre pour les cinq prochaines années. L'émission de NO_x a été réduite de 72 % depuis 1985. Dans la même période, l'émission de CO a été réduite de 85 % et l'émission de HC de 81 %. De plus l'émission en masse de particules rejetées a été réduite de 86 % depuis 1990. Toutes ces réductions

sont liées à l'amélioration de la technologie des moteurs diesel comme par exemple le turbocompresseur, l'intercooling, l'EGR (Exhaust Gas Recirculation : recirculation des gaz d'échappement), le dessin de la chambre de combustion, la hausse de la pression d'injection...

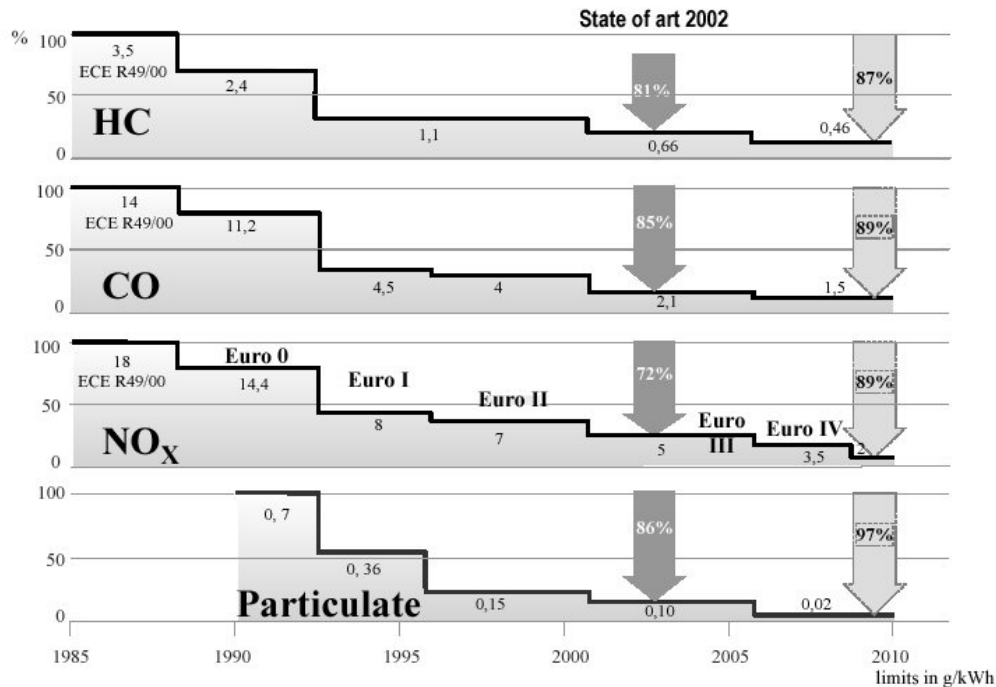


Figure I- 1 : Historique des standards d'émission européen (Mahr, 2002).

Dans les années à venir, en plus de la réduction des émissions polluantes, les constructeurs vont être confrontés à un autre problème, celui de trouver une énergie de substitution. Au rythme de la consommation actuelle, la réserve mondiale de pétrole n'est plus que d'une cinquantaine d'année. Des études sont en cours sur les piles à combustible et les moteurs à hydrogène ainsi que sur les carburants d'origine végétale. Le pétrole étant une énergie fossile, c'est-à-dire que le CO₂ rejeté n'est pas consommé par la plante qu'il l'a produit, contribue à l'effet de serre ce qui n'est pas le cas pour les carburants d'origine végétale. Que ce soit du tournesol, du colza, de l'arachide, de la palme, du lin...l'huile végétale brûle dans les moteurs diesel. Cette énergie renouvelable a beaucoup d'avantages :

- Beaucoup moins polluante, elle ne contribue pas à l'effet de serre, le CO₂ dégagé sera reconsumé par une plante,
- Ressource locale, transformée sur place, et dont le sous produit : le tourteau constitue un excellent aliment pour les animaux,
- Simple et peu coûteuse à produire, son utilisation est possible dans pratiquement tous les moteurs diesel.

L'utilisation de l'HVB (Huile Végétale Brute) de colza comme carburant est déjà répandue en Allemagne, en Suède et au Danemark. Mais de nombreux freins s'opposent à son développement. Des sociétés produisant de l'HVB ont été assujetties, par exemple, à la TIPP (Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers). Dans le plan Climat présenté par le gouvernement français en juillet 2004, l'une des propositions est d'incorporer progressivement les biocarburants dans les carburants d'origine pétrolière, pour parvenir à l'objectif européen de 5,75% d'ici 2010.

Objectifs et organisation de notre travail

Les problèmes de pollution et de consommation sont au cœur des préoccupations actuelles des motoristes. Ainsi dans le but d'une diminution des émissions, des systèmes de diagnostics optiques sont à l'étude afin d'améliorer la conception des injecteurs et la compréhension des phénomènes. L'amélioration de la qualité du mélange air – carburant, qui permettra une diminution des rejets et de la consommation, passe par une meilleure connaissance des phénomènes ayant lieu à l'intérieur de l'injecteur, notamment le phénomène de cavitation, mais également et ce sera l'objet de ce travail la compréhension du phénomène régissant l'évolution du spray dans le milieu ambiant du cylindre.

Pour connaître avec précision l'évolution des sprays au cours de l'injection, un système de diagnostic non intrusif et par conséquent optique est donc nécessaire. L'injection étant un phénomène rapide, l'utilisation de caméra intensifiée et numérique a permis un bond en avant des expérimentations. L'étude des paramètres que sont la pénétration, l'angle, le volume nécessite une connaissance des contours de l'objet et ceci n'est possible que par un traitement d'image automatique de façon à éviter toute influence de l'utilisateur.

Ainsi l'objectif de ce travail est de fournir aux constructeurs un système de diagnostic optique fiable et pleinement automatique basé sur un traitement d'image efficace dans le but d'étudier l'évolution des sprays au cours de l'injection.

Le présent manuscrit s'articule en cinq chapitres.

Le Chapitre 1 présente de façon générale les systèmes d'injection diesel haute pression, nous étudierons ensuite la formation du spray et présenterons les paramètres influençant la morphologie du spray diesel. Nous verrons également les différents domaines de compétences abordées au cours de cette thèse.

Le chapitre 2 s'appuie sur une étude bibliographique des différents aspects sur lesquels nous nous sommes trouvés confrontés au cours de ce travail. Dans un premier temps, nous présenterons quelques chambres d'observation existantes ainsi que différentes techniques associées. Nous ferons également le point sur les observations faites à grands champs avec les lois empiriques concernant les paramètres étudiés. Dans un second temps, nous verrons l'observation à petit champ et plus particulièrement la caractérisation des gouttelettes. Enfin nous étudierons d'autres moyens de mesure, non visuelle que sont les débitmètres.

Le dispositif expérimental élaboré au cours de cette thèse est décrit au chapitre 3. Nous présenterons tout d'abord la partie matérielle mais de façon relativement succincte, plus de détails pouvant être trouvé dans l'annexe interne à EFS. Ensuite, nous présenterons la partie logicielle avec l'explication de l'acquisition des images et enfin nous verrons les différents bancs de visualisation que nous avons réalisés.

Le chapitre 4 est dédié aux traitements appliqués sur les images obtenues. Nous verrons différentes techniques que nous avons appliquées sur les images à grand champ pour la segmentation des jets et présenterons ensuite l'holographie numérique pour la localisation des gouttes à petit champ.

Le chapitre 5 présente une interprétation des résultats obtenus à l'aide de notre système à la fois à grand champ et à petit champ. Pour les observations à grand champ, nous présenterons l'ensemble des données accessibles grâce à notre système. Nous comparerons nos résultats aux lois empiriques de la littérature présentées au chapitre 2 et présenterons des améliorations de celles-ci. Pour les observations à petit champ, nous présenterons les résultats obtenus par holographie numérique bien qu'il soit incomplet et montrerons le potentiel de la méthode.

Enfin nous tirerons les principales conclusions de notre étude et verrons comment le système peut être amélioré tant sur le plan matériel que logiciel.

Chapitre 1. Le spray diesel haute pression

A l'heure actuelle, la réduction des émissions et de la consommation tout en améliorant les performances des véhicules passe par une amélioration du système de combustion. Dans cette partie nous allons rappeler les différents composants constituant le système d'injection, (d'autres précisions pourront être trouvées en annexe 1). Ce système d'injection entraîne la formation d'un spray dans la chambre de combustion qui peut être caractérisé par un jeu de paramètres morphologiques dont nous donnerons les définitions.

1.1. Injection diesel haute pression

Le mode de propulsion diesel a connu une forte croissance ces dernières années due à l'arrivée des systèmes d'injection haute pression. Dans cette partie, nous allons voir brièvement les différents composants d'un système d'injection et ensuite nous présenterons l'injecteur diesel common rail (nous ne parlerons pas des systèmes d'injecteur pompe). Plus de détails peuvent être trouvés en annexe 1.

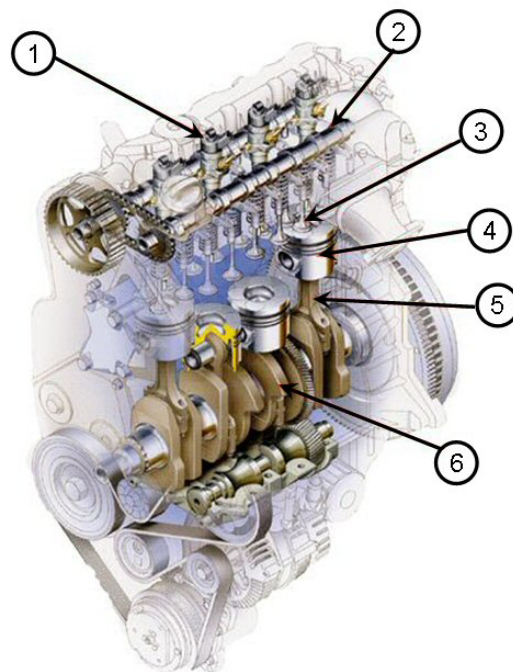
1.1.1. Inventaire des systèmes

Le principe de chambre divisée (ou injection indirecte), sous diverses formes, s'est imposé sur le moteur diesel jusqu'à ces dernières années. Cette configuration a permis de réaliser des moteurs capables d'atteindre des régimes élevés, de l'ordre de 5000 tr/min, avec un niveau de bruit acceptable et un comportement bien adapté à la motorisation des voitures. Le dispositif d'injection requis est assez simple, et des pressions d'injection de l'ordre de 20 MPa suffisent. Par contre le moteur diesel à injection indirecte présente deux inconvénients préjudiciables à son rendement énergétique : d'une part, la combustion est initiée dans une chambre annexe, augmentant ainsi les pertes thermiques, et d'autre part, les gaz chauds doivent passer de cette chambre au cylindre à travers un étroit canal générateur de perte de charge.

C'est pourquoi les constructeurs automobiles se sont orientés vers le procédé d'injection directe qui évite ces pertes thermomécaniques. Si cette configuration s'est imposée depuis longtemps sur les moteurs industriels, son adaptation aux petits moteurs rapides automobiles s'est heurtée à d'importants problèmes liés au bruit et aux fumées.

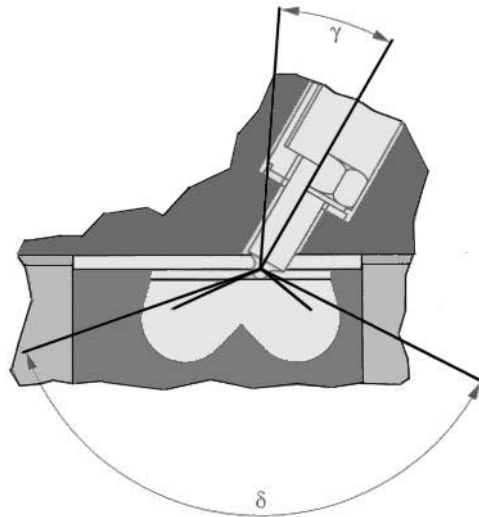
La technologie d'injection et les principes physiques fondamentaux qui la gouvernent sont des paramètres importants dans le déroulement du cycle moteur. Ils conditionnent l'introduction de la charge de carburant dans une masse d'air en cours de compression.

Le système d'injection assure l'alimentation en carburant du moteur diesel. Il y a plusieurs types de systèmes d'injection, entre autres : les pompes d'injection en ligne, les pompes d'injection distributrices, les pompes d'injection unitaires basse et haute pression, l'injecteur pompe (ces systèmes font aussi partie des pompes d'injection unitaires), le système d'injection à accumulateur (Common Rail : CR) et plus récemment une nouvelle génération du système d'injection à accumulateur équipé d'un injecteur avec une commande piézoélectrique (Piezoelectric Common Rail PCR). La Figure 1-1 et la Figure 1-2 montre le positionnement de l'injecteur dans le cylindre moteur. L'injecteur peut être mis en position verticale Figure 1-1 ou inclinée Figure 1-2 selon la conception du moteur mais dans chaque cas, le positionnement des trous est différents ceci afin d'assurer un bon angle de nappe.



1- Injecteur 2- Arbre à cames 3- Soupapes 4- Piston 5- Bielle 6- Vilebrequin

Figure 1-1 : Moteur 4 cylindres avec injecteur en position vertical (1).



γ : inclinaison de l'injecteur δ : angle de nappe

Figure 1-2 : Injecteur en position incliné.

A part les systèmes d'injection à accumulateur, la pression d'injection de tous les autres systèmes dépend de la vitesse de rotation de la pompe et la programmation de l'instant d'injection nécessite l'intervention d'un système mécanique (synchronisation mécanique ou commande directe par l'arbre à came). Aussi, la pression à l'entrée de l'injecteur augmente progressivement durant l'injection en passant par un pic. La réalisation d'injection multiple n'est pas possible avec ces systèmes. A la fin des années 90, nous avons connu les injecteurs à double ressort qui sont utilisés avec les pompes distributrices. Ces injecteurs permettent une levée d'aiguille à deux étages. L'apparition des ces injecteurs fut une étape avant le passage aux systèmes d'injection CR qui permettent la réalisation d'injections multiples indépendamment de la pression d'injection qui est maintenue constante dans un accumulateur de carburant. Egalement, les instants et les durées d'injection peuvent être maîtrisés avec une grande souplesse grâce à la commande électronique de l'injecteur.

Dans le paragraphe suivant, nous allons décrire rapidement le principe de fonctionnement d'un injecteur haute pression « common rail ».

1.1.2. L'injecteur diesel Common Rail

Les injecteurs diesel équipant les systèmes d'injection directe CR sont des électro-injecteurs. Autrement dit, ils sont pilotés électriquement. Si l'injecteur est resté, dans son principe, identique à ceux d'un dispositif plus ancien, le porte injecteur (Figure 1-3) est maintenant

surmonté d'une électrovanne de commande (plus de détails concernant le principe du système d'injection et de l'injecteur peuvent être trouvés dans l'annexe 1).

Le porte injecteur reçoit à sa base l'injecteur. Ce dernier est constitué d'une aiguille et d'un nez percé de plusieurs trous ou buses.

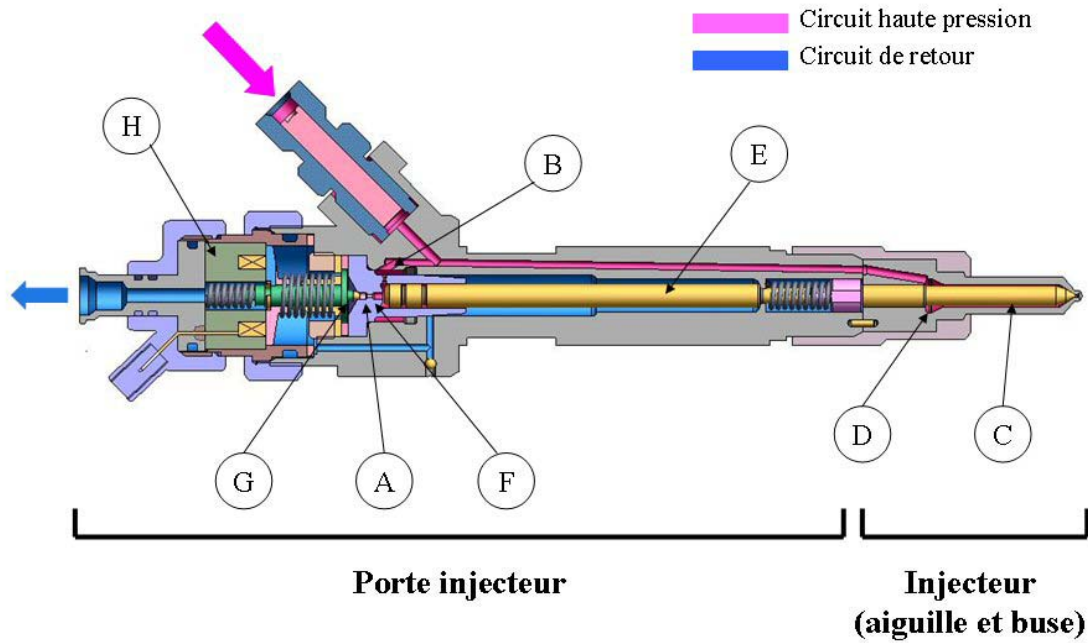
L'ouverture des injecteurs est obtenue par un effet de pression différentielle. Lorsqu'une commande électrique d'ouverture de l'injecteur est reçue (un temps de commande), le bobinage H est alimenté par un fort courant d'appel (20A). La force magnétique résultante provoque la levée rapide de l'aiguille pilote G.

La bille est soulevée de son siège par la haute pression issue du rail d'accumulation, ouvrant alors la communication avec le circuit de retour au réservoir de carburant.

Par les deux calibrages A et B, la pression régnant dans le volume de commande F se détend en regard de celle entretenue par le rail dans la chambre de pression D.

La force agissant sur le piston de commande E diminue, l'équilibre est rompu. La force engendrée par la haute pression de la chambre D provoque le soulèvement de l'aiguille C.

Malgré la commande électrique de cet injecteur, l'ouverture de l'aiguille est obtenue par un effet de pression différentielle qui retarde le début de l'injection (quelques centaines de microseconde) et par suite, limite le nombre d'injections multiples. En plus, la commande électrique ne permet pas de gérer la position de l'aiguille. D'où, une nouvelle génération du système d'injection CR, équipée d'un injecteur piézoélectrique, a été créée. La bobine a été remplacée par un activateur piézoélectrique et le volume de commande a été supprimé (Stegemann, 2002). Parmi les avantages de ce nouveau système, nous pouvons citer : plus de précision sur les durées et les instants d'injections, une meilleure gestion du positionnement de l'aiguille et une augmentation du nombre d'injection (multi-injections).



A- Gicleur d'ouverture de l'injecteur B- Gicleur de réalimentation C- Aiguille d'injecteur D- Chambre de pression
 E- Piston de commande F- Volume de commande (10 mm³) G- Aiguille pilote et sa bille H- Solénoïde

Figure 1-3 : Schéma de principe d'un injecteur de type Common Rail (Bosch, 1999).

1.2. Formation du spray

Le paragraphe précédent nous a permis de voir les différents éléments permettant de transporter le carburant dans la chambre de combustion. L'injecteur est la dernière étape de ce circuit. La Figure 1-4 montre les différents paramètres pouvant influencer la formation du spray. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser à la formation du spray puis nous présenterons les grandeurs caractéristiques du spray que sont la pénétration, l'angle, le volume et à partir du volume la richesse globale du mélange.

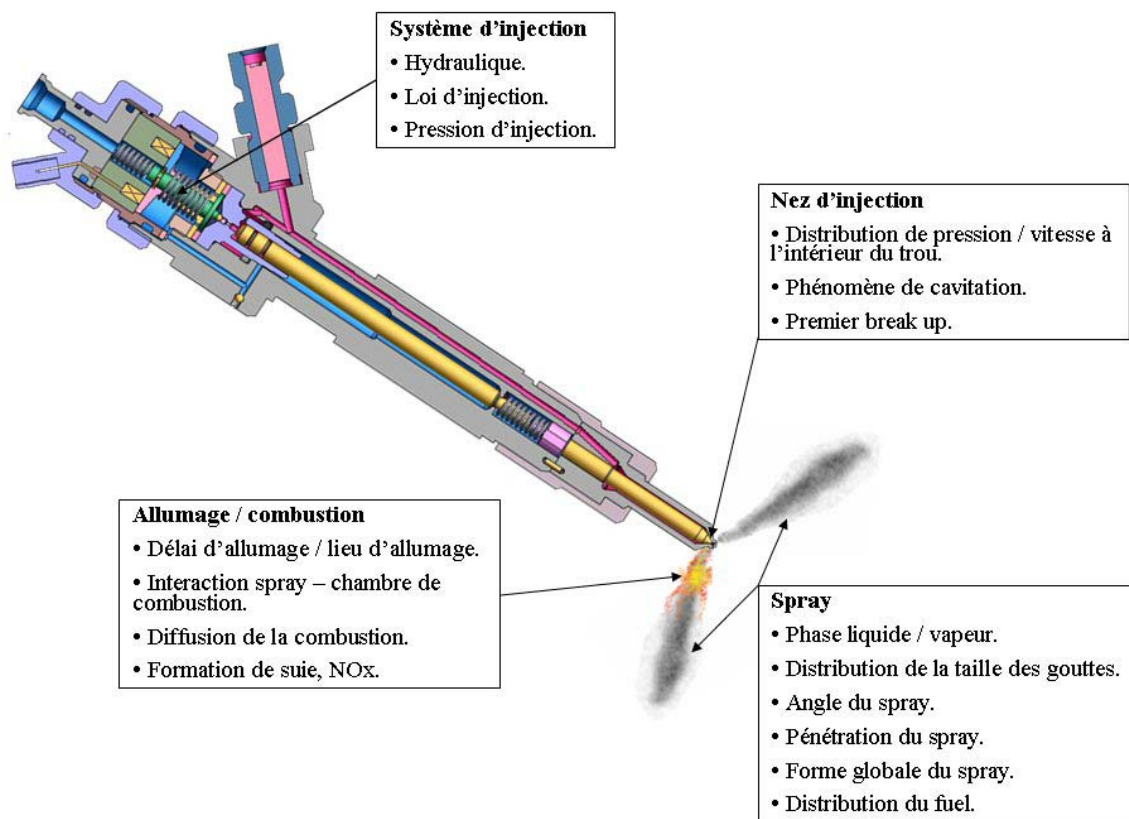


Figure 1-4 : Paramètres influençant l'injection.

Les phénomènes régissant le taux d'introduction, la pulvérisation et la vaporisation sont autant de paramètres à comprendre pour évaluer leurs implications respectives sur la qualité de la combustion. Cela permettra de mieux contrôler cette dernière, particulièrement en termes d'émissions. De plus, une compréhension accrue des phénomènes physiques liés à l'injection permet de mieux modéliser et ainsi d'améliorer la prédictibilité des codes de calcul utilisés pour la conception des nouveaux groupes motopropulseurs.

D'une manière générale, le principe d'atomisation peut être décomposé en cinq étapes principales schématisées sur la Figure 1-5. Chacune d'elles présente des problèmes spécifiques et influence de manière non négligeable celles qui la suivent.

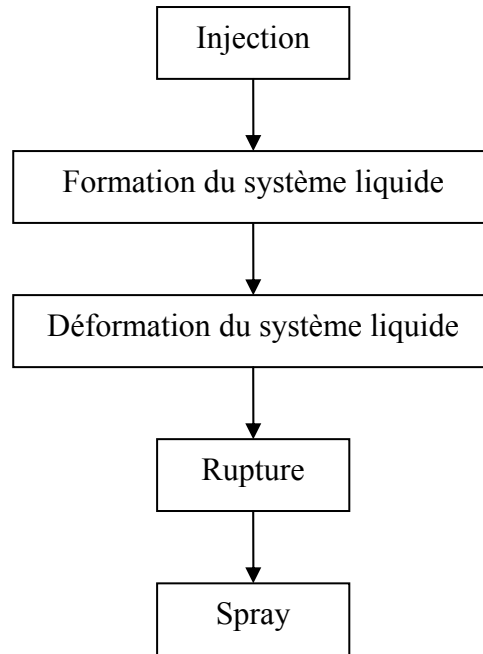


Figure 1-5 : Etapes de la formation d'un spray (Dumouchel, 1996).

Seul responsable des propriétés du système liquide et influençant considérablement la forme du spray, l'*injecteur* est la pièce maîtresse de ce diagramme. Les caractéristiques de l'*écoulement liquide* qu'il génère conditionnent tout le processus de *pulvérisation* et donc le *spray* qui en résulte. Elles sont imposées par l'écoulement qui se développe au sein même de l'injecteur, et dépendent de sa géométrie interne, de la pression d'injection et des propriétés physiques du liquide.

A partir de l'orifice du nez de l'injecteur, l'écoulement liquide évolue librement dans un environnement gazeux dont les propriétés physiques et cinématiques jouent, elles aussi, un rôle sur la formation du spray.

Dans un premier temps, nous allons présenter une analyse physique du problème puis nous ferons un état des lieux de nos connaissances concernant la formation du spray.

1.2.1. Analyse physique du problème

Du point de vue physique, l'injection diesel est un problème complexe, le nombre de paramètres susceptibles d'intervenir est important et un certain nombre d'entre eux sont mal connus. Dans notre analyse, nous nous limiterons à l'injection proprement dite sans tenir compte de ce qui peut se passer ensuite à savoir la combustion.

On peut distinguer deux types d'échelles de longueur, celles qui sont liées à la géométrie de l'injecteur et celles qui sont liées aux processus physiques.

En ce qui concerne la géométrie de l'injecteur, le diamètre de la buse d'injection, la longueur du conduit amenant le carburant à la buse sont des paramètres évidents. Plusieurs études (dont Baz, 2003) ont montré que la rugosité du conduit intervient sur le déclenchement de la cavitation à l'intérieur du conduit.

Les échelles de longueur liées aux processus physiques sont nombreuses et il est difficile de déterminer leurs degrés d'indépendance les uns par rapport aux autres. De plus ces échelles varient avec le temps. Si on essaie de faire un inventaire de ces échelles en partant de l'amont, il y a d'abord la taille des bulles ou des poches de cavitation dans le conduit puis les dimensions du jet en phase liquide, les tailles de gouttelettes et les échelles caractéristiques de la turbulence dans les deux phases.

Les échelles de temps sont liées aux mouvements mécaniques (temps d'ouverture de l'aiguille, temps caractéristique du mouvement du piston) et à l'écoulement donc à la différence de pression entre le sac et le milieu extérieur.

D'autres paramètres physiques interviennent tels que la pression d'injection, la contre pression, la masse volumique, du carburant liquide ou en phase vapeur, etc...

Une analyse dimensionnelle complète ferait intervenir une bonne dizaine de paramètres sans dimension et donc il serait difficile de prendre en compte la totalité. Le passage par des équations est encore plus complexe puisque même la dynamique d'une particule sphérique rigide dans un écoulement obéit à une équation intégral-différentielle non linéaire (Annexe 9). Par conséquent, les méthodes pour décrire et prédire les écoulements comportent donc forcément une grande part d'empirisme.

Dans les ouvrages sur les sprays (Lefebvre, 1988; Sirignano, 1999 ; Frohn et Roth, 2000), les différents problèmes sont abordés indépendamment et les synthèses empiriques ou semi empiriques explicitées.

Si on suit l'écoulement, les paramètres adimensionnels qui déterminent la structure de l'écoulement dans l'injecteur sont :

- Le nombre de Reynolds : $Re = \frac{v d_{inj}}{\nu}$

où v est la vitesse moyenne dans le conduit, d_{inj} le diamètre du conduit, ν viscosité cinématique. La viscosité cinématique est donné en annexe 5.

- La rugosité relative du conduit $\frac{\varepsilon}{d_{inj}}$

où ε est la hauteur de rugosité.

- Un nombre de cavitation $K_c = \frac{P_s - CP}{CP - P_v}$

où P_s est la pression sac en amont, P_v est la pression de vapeur saturante.

- Le nombre de Weber, caractéristique des effets de tension superficielle $We = \frac{d_{inj} \rho_l V^2}{\sigma_l}$

où ρ_l est la masse volumique et σ_l la tension superficielle.

Le rôle des caractéristiques thermiques a été peu pris en compte dans les expériences bien que de tout évidence de l'énergie est nécessaire pour vaporiser le fluide.

Dans le nez de l'injecteur, les expériences de Baz, 2003, montrent des poches de cavitation pour des pressions relativement faibles (70 MPa).

Dans la partie jet, l'écoulement comporte deux phases gazeuses et une phase liquide. La phase liquide est composée d'une partie homogène aux frontières chaotiques qui se transforme en gouttelettes de différentes tailles qui majoritairement peuvent se séparer en gouttelettes plus petites mais quelques fois aussi coalescer. En plus des paramètres précédents, interviennent les paramètres sans dimension suivants :

- Nombre de Reynolds des particules $Re = \frac{(U_p - U_f)d}{\gamma_m}$

où d est le diamètre de la particule, γ_m est la viscosité du gaz autour de la particule, $U_p - U_f$ est la différence de vitesse entre gaz et fluide.

- Coefficient de traînée de la particule $C_x = \frac{8F}{\rho \pi d^2}$

où F est la force de traînée.

- Taux de croissance de la particule.
- Fonction des paramètres thermiques.

Bien entendu, l'étude des relations entre ces divers paramètres est hors de notre sujet attaché au développement des techniques rapides de caractérisation d'injecteurs. Ces techniques permettront dans le futur de préciser ces relations.

1.2.2. Les mécanismes et les modèles de formation du spray

Après cette analyse physique du problème, nous allons présenter les mécanismes et les modèles de formation du spray que différents auteurs à partir de leurs observations ont mis en place.

Fath et *al.*, 1997, ont déduit de leurs observations à basse pression (15 MPa) la présence d'un cœur liquide intact en sortie d'injecteur. La longueur de ce cœur serait directement proportionnelle à la durée de survie des bulles de cavitation dans le jet. La cavitation augmente la production de la turbulence qui conduit à la déformation de l'interface et à la formation de gouttelettes du fait des importantes forces aérodynamiques. En 1998, les mêmes auteurs ont étendu leurs recherches à d'autres pressions d'injections et diamètres de buses différents (Fath et *al.*, 1998). Selon leurs observations, l'augmentation de la pression dans la chambre ainsi que l'augmentation de la pression d'injection diminue la longueur du cœur liquide, alors que l'augmentation du diamètre de l'injecteur semble allonger la longueur de ce cœur liquide. Ils en concluent :

- La longueur du cœur liquide est en dépendance linéaire décroissante avec la pression ambiante ;
- La longueur du cœur liquide est proportionnelle à la racine carrée du diamètre de l'injecteur ;
- Sa dépendance à la pression d'injection semble de nature hyperbolique.

Chang et Farrell, 1998, ont observé la présence de ligaments près de l'injecteur qui laissent place à des gouttelettes lorsque la pression ambiante augmente.

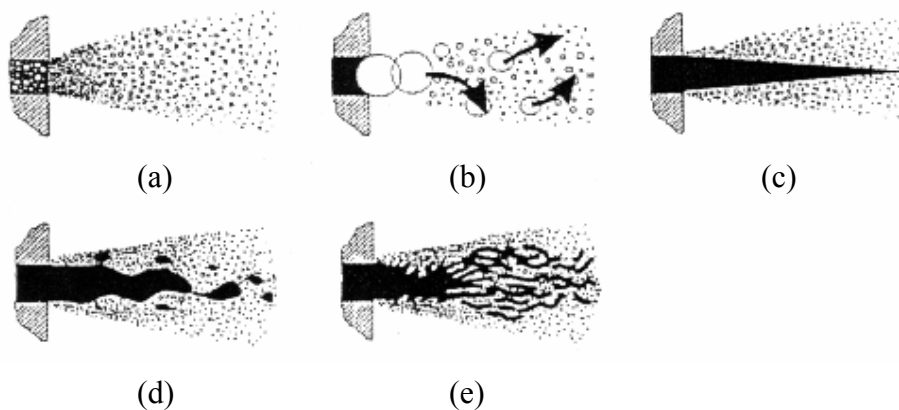


Figure 1-6 : Modèle de ruptures énumérés par Fath et *al.*, 1997.

Plusieurs approches tentent de modéliser les phénomènes de pulvérisation primaire, de la pulvérisation spontanée (Figure 1-6 (a)) à l'épluchage aérodynamique du cœur liquide (Figure 1-6 (c)) en passant par la déstabilisation de celui-ci (Figure 1-6 (e)).

Nous allons présenter rapidement quelques uns de ces modèles afin de montrer leurs disparités, représentatives de notre incompréhension des mécanismes de pulvérisation primaire du jet diesel.

En 1995, Chaves et *al.*, 1995, pensaient que la présence de cavitation dans l'injecteur pouvait conduire à une « pulvérisation directe à la sortie de l'injecteur ne présentant aucune longueur intacte » de fluide. Fath et *al.*, 1997 ainsi que Badock et *al.*, 1999 ont postulé la présence d'un cœur liquide intact suite à leurs observations par tomographie laser. Aujourd'hui, les interrogations concernant la nature du jet diesel en sortie d'injecteur ne sont pas encore résolues. Cependant, il est généralement admis que la cavitation et la turbulence jouent un rôle primordial dans le processus de pulvérisation primaire, que ce soit dans l'injecteur où à sa proche sortie.

Huh et Lee, 1998, ont développé un modèle en considérant que les gouttelettes se détachent d'un cœur liquide uniquement via la croissance d'instabilité de type Kelvin-Helmoltz qui sont initiées en sortie de l'injecteur par la turbulence. On note qu'un tel modèle ne tient pas compte des effets de la cavitation et de la turbulence.

D'autres modèles exploitent ces effets d'un point de vue purement énergétique. Ainsi à partir de leurs observations expérimentales, Baumgarten et *al.*, 2002, ont proposé un modèle d'atomisation qu'ils ont utilisé dans leur code de calcul.

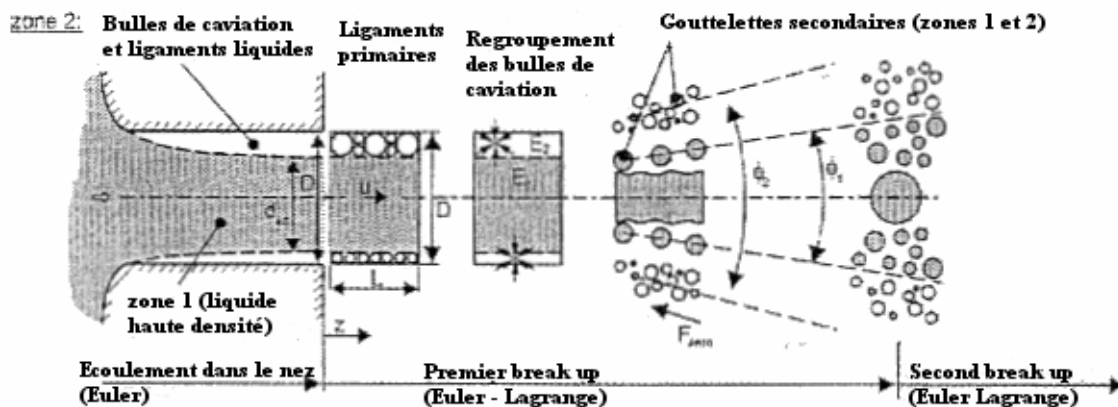


Figure 1-7 : Modèle de pulvérisation proposé par Baumgarten et *al.*, 2002.

Pour ces auteurs, la pulvérisation primaire est initiée dans l'injecteur via les phénomènes de cavitation. Ils distinguent une zone liquide (zone 1) et une seconde zone (zone 2), moins dense le long de la paroi, constituée de bulles de cavitation et de ligaments liquides.

Récemment, Hattori et *al.*, 2004, à la suite d'observations par tomographie laser, proposèrent le modèle suivant pour les premiers instants d'injection : le jet liquide initial peut être divisé en 2 zones : un cœur liquide intact et un bout de jet en forme de parapluie ou champignon déjà observé par Badock et *al.*, 1999. Ils proposèrent que la rupture se produit à la périphérie de la zone en forme de parapluie. L'injecteur utilisé est un injecteur à sac (DLL-S type).

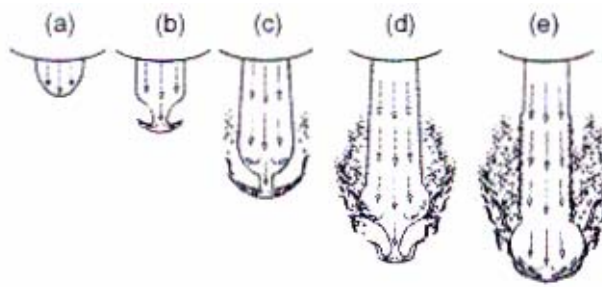


Figure 1-8 : Modèle du premier break up par Hattori et *al.* 2004.

Quand le liquide est injecté dans le milieu ambiant, le jet est bombé du fait que sa vitesse décroît sensiblement de l'axe vers la périphérie du trou. (Figure 1-8 (a)). Due à la résistance de l'air, les forces de cisaillement forment alors une fine ombrelle (Figure 1-8 (b)). Quand l'ombrelle devient très fine, le phénomène de break up commence au bout de l'ombrelle (Figure 1-8 (c) et (d)). Un groupe de gouttes se forme alors autour du jet.

Maintenant que nous en savons plus concernant la formation du spray, voyons les paramètres morphologiques caractérisant ces jets.

1.3. Paramètres morphologiques du spray

Nous avons vu que la formation du spray est très délicate à appréhender. A défaut d'étudier des paramètres relativement complexes, nous nous contenterons dans une première approche pour le système industriel, d'une étude des paramètres de forme globaux des jets.

Les principaux paramètres du spray sont les suivant :

- Pénétration
- Angle
- Volume
- Richesse

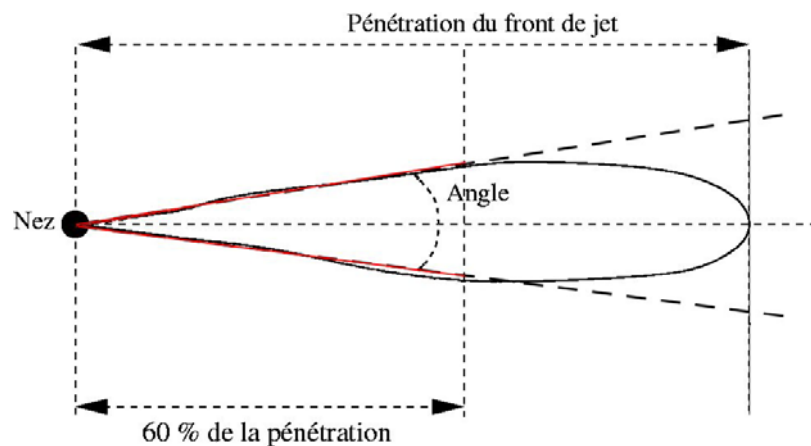


Figure 1-9 : Paramètres morphologiques d'un spray.

On verra que la détermination de ces paramètres nécessite la connaissance des contours de l'objet étudié. Les différentes méthodes de segmentation que nous avons étudiées au cours de ce travail seront abordées au chapitre 4.

1.3.1. Pénétration

La pénétration du front de jet est définie par la distance entre le nez de l'injecteur et le point le plus éloigné sur le contour du jet (Figure 1-9).

La pénétration d'un spray est de première importance pour les constructeurs. Une pénétration trop grande et c'est le risque d'un contact du jet avec les parois de la chambre de combustion. Ceci est acceptable si les parois sont suffisamment chaudes et que l'entraînement d'air est suffisamment important mais dans la plupart des moteurs ceci n'est pas le cas. Par conséquent une pénétration trop grande va entraîner un contact avec les parois et donc un gaspillage de fuel. D'un autre côté, si la pénétration n'est pas bonne alors le mélange air – fuel ne sera pas bon. Les meilleures performances moteur sont obtenues quand la pénétration est adaptée à la taille et la géométrie de la chambre de combustion. Par conséquent les méthodes de calcul de la pénétration sont nécessaires pour l'élaboration du moteur. Dans notre étude, nous comparerons nos résultats aux lois empiriques proposées par Dent, 1971 et Hiroyasu et Arai, 1990, exposée dans la partie suivante et au chapitre 5, nous verrons comment modifier ces lois dans le cas de nos injecteurs.

1.3.2. Angle

Plusieurs définitions pour l'angle du spray existent. La première et c'est celle que nous retiendrons est de prendre comme définition de l'angle, l'angle sous-tendu par les segments de droite passant le mieux par les points dessinés entre le nez de l'injecteur et le point sur la périphérie du jet à une distance équivalente à 60% de la longueur du jet (Pastor et *al.* 2000). La seconde définie par Bae et *al.*, 2002, est l'angle entre les deux droites passant par les points sur les contours du jet à 50% de la longueur de pénétration.

L'angle du spray a une influence importante sur les performances à l'allumage, les limites du front de flamme et l'émission de suie et de fumée.

1.3.3. Volume

Pour la détermination du volume, on supposera que le jet est un volume de révolution. Différentes méthodes de détermination du volume du spray à partir des images existent :

- Connaissant l'aire A du jet et sa pénétration S , il existe une relation permettant d'en déduire une approximation du volume (Chagnot-Auclair, 1998) :

$$V_S = \frac{\pi}{3} \left(\frac{A^2}{S} \right) \quad (1.1).$$

- Une autre méthode (Castellanos, 2002 ; Holguin et *al.* 2004), celle que nous avons adopté, est de modéliser le jet comme une succession de disques empilés ou cylindre. Le diamètre de chaque disque d_v correspond à la largeur du spray et le volume de chaque cylindre est obtenu en utilisant l'équation suivante avec Δx (hauteur du cylindre) égal à un pixel (Figure 1-10).

$$\Delta V = \frac{\pi d_v^2}{4} \times \Delta x \quad (1.2)$$



Figure 1-10 : Volume du jet.

1.3.4. Richesse

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à une richesse globale du jet. L'observation du rapport *air/fuel* fournit une bonne indication du délai d'auto-inflammation. Pour déterminer cette grandeur, il faut connaître en plus du volume global du jet déterminé plus haut, la quantité instantanée de carburant injecté. La difficulté réside dans la nature diphasique du fluide à la sortie de l'orifice d'injection.

Le volume de carburant injecté au cours du temps est obtenu en utilisant un débitmètre **MIQ**.

Soit M_{totale} la masse totale de fuel injectée :

$$M_{totale} = M_{fuel} + M_{air} \quad (1.3)$$

où M_{fuel} est la masse de fuel et M_{air} est la masse d'air ou d'azote.

Connaissant M_{totale} et M_{fuel} , il faut pouvoir déterminer la masse d'air.

Les masses volumiques de l'huile et de l'air dépendent de la pression d'injection et de la température pour l'huile (Annexe 5) et de la contre pression et de la température pour l'azote (Annexe 6).

Pour obtenir les masses de fluides, nous allons réaliser une étude du volume :

$$V_{total} = V_{fuel} + V_{air} \quad (1.4)$$

ρ_l : masse volumique de l'huile (en kg/m³) ;

ρ_g : masse volumique de l'air (en kg/m³).

$$V_{fuel} = \frac{M_{fuel}}{\rho_l}, \quad V_{air} = \frac{M_{air}}{\rho_g}$$

$$V_{air} = V_{total} - V_{fuel}$$

Le volume du spray peut être obtenu par mesure sur les images, le volume de liquide par le débitmètre, il est alors possible d'obtenir le volume d'air.

Connaissant le volume d'huile et d'air injecté, il est possible d'en déduire le rapport *air/fuel* et par conséquent il est possible d'en déduire ϕ , richesse globale du mélange :

$$\phi = \frac{M_{air} / M_{fuel \text{ stoich}}}{M_{air} / M_{fuel \text{ actuelle}}} \quad (1.5)$$

On supposera que le rapport $M_{air} / M_{fuel \text{ stoich}}$ est égal à 15.

1.4. Objectifs et Compétences développées

Les systèmes d'injection génèrent un spray dont les paramètres exposés précédemment doivent être évalués. Ce travail apporte une réponse à deux niveaux : d'abord en proposant un outil de diagnostic sur les sprays, ensuite en exploitant cet outil dans différentes conditions.

L'objet essentiel est le développement d'un système de caractérisation macroscopique ou morphologique du jet diesel, et de sa richesse. Il a été réalisé au sein de la société EFS. Cette société spécialisée dans la conception et la réalisation de tout système spécifique à base d'électronique, offre déjà une large gamme de débitmètres de carburant tel que l'**EMI2** (annexe 8), le **MIQ** (Mono Injector Qualifier) pour les injecteurs diesel haute pression. De nouveaux systèmes de mesure de débit sont en cours d'élaboration tel que l'**IFR** (Instantaneous Flow and Rate) (Schmidt, 2002), pour les injecteurs diesel haute pression et le LPF (Low Pressure Flowmeter) (Schmidt, 2002) pour les injecteurs essence.

Avec le développement des nouvelles stratégies de combustion que sont les système d'injection diesel haute pression « common rail » ou injecteur pompe et bientôt les système HCCI, la société EFS souhaite, à travers ce travail, compléter son offre client en proposant un nouveau système de contrôle d'injecteurs, basé sur les techniques d'imagerie. Le système doit

mesurer de façon automatique les paramètres morphologiques des jets diesel haute pression dans les conditions moteur. La nouveauté réside dans

- l'automatisation des mesures : du signal d'injection à la valeur des paramètres mesurés,
- les conditions voisines du fonctionnement moteur allumé, c'est à dire avec contre-pression en aval de l'injecteur.

A l'aide de cet outil d'analyse des sprays, des investigations seront alors réalisées, sur différents types d'injecteurs actuels (les injecteurs 1 et 2 sont deux injecteurs commerciaux dont les caractéristique sont données en annexe 4), dans différentes conditions expérimentales de pression coté amont alimentation par le CR, et aval en contre pression. Ces essais permettront la calibration du système, et sa validation. La base de données obtenue sera comparée à celles de la littérature.

Plusieurs étapes correspondantes à différentes compétences sont mises en jeu :

- Conception, et la réalisation de la chambre de pression. Cette partie mécanique sera abordée dans le chapitre 3 et dans l'annexe interne à EFS.
- Mise en place de plusieurs bancs de visualisation pour différents types de visualisation. Utilisation de plusieurs types de caméra et de sources de lumière (Laser continu et pulsé). Cette partie instrumentation est abordée dans le chapitre 3.
- Elaboration d'un logiciel de pilotage de caméra et de traitement d'image dans le but d'extraire les paramètres utiles des images. Cette partie informatique et traitement d'image est traitée dans le chapitre 4.
- Etude expérimentale de l'évolution du spray au cours de l'injection aussi bien en champ proche qu'en champ lointain Cette partie mécanique des fluides et énergétique du moteur sera présentée au chapitre 5.

Chapitre 2. Etat de l'art et revue bibliographique

Les moteurs à injection diesel pour l'automobile ont connu des évolutions importantes ces dernières années avec l'arrivée de l'injection haute pression. Comme nous l'avons vu précédemment, l'une des étapes principales du processus de combustion est la formation et l'évolution du spray dans la chambre de combustion. Dans ce chapitre, nous allons présenter dans une première partie, une bibliographie non exhaustive concernant le spray à grand champ, puis dans une seconde partie nous aborderons le spray à petit champ et les phénomènes de break up et de formation des gouttelettes. Enfin dans une troisième partie, nous évoquerons les différentes techniques de mesure de débit existantes.

2.1. Bibliographie sur le spray à grand champ

La visualisation du spray à grand champ est la principale caractéristique du système industriel mise en place. Dans cette partie, nous allons étudier tout d'abord quelques chambres de pression qui nous ont inspirée, puis nous aborderons les différentes méthodes de visualisation optique existante. Enfin, nous présenterons un historique des observations faites à grands champs et nous verrons différentes lois empiriques obtenues sur la pénétration et l'angle à partir de ces observations.

2.1.1. Les chambres de pression

Pour leurs besoins spécifiques, des auteurs ont développé leurs propres chambres de visualisation. Certaines sont très simples de conception comme celle de Bae et Kang, 2000 : une cavité sans aucun système de nettoyage. D'autres sont très complexes avec une ventilation de type veine aérodynamique Payri et *al.*, 1996 ou circulation d'air Fettes et *al.*, 1999. Il existe également des systèmes où le phénomène de combustion peut avoir lieu tels que les cylindres transparents (Maunoury, 2001). Dans notre cas, l'injection aura lieu dans un milieu inerte, sans combustion possible.

La chambre de Bae et Kang, 2000.

La chambre de Bae et Kang, 2000, utilisée également dans Bae et *al.*, 2002, est formée d'un cylindre avec 3 hublots de visualisation de diamètre 80 mm. 2 sont utilisés pour l'éclairage et 1 pour la caméra. Elle est pressurisée à l'aide de N₂ et peut monter jusqu'à 7 MPa.

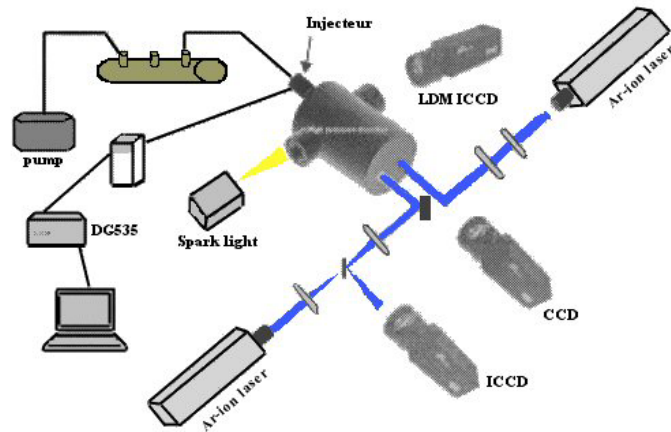
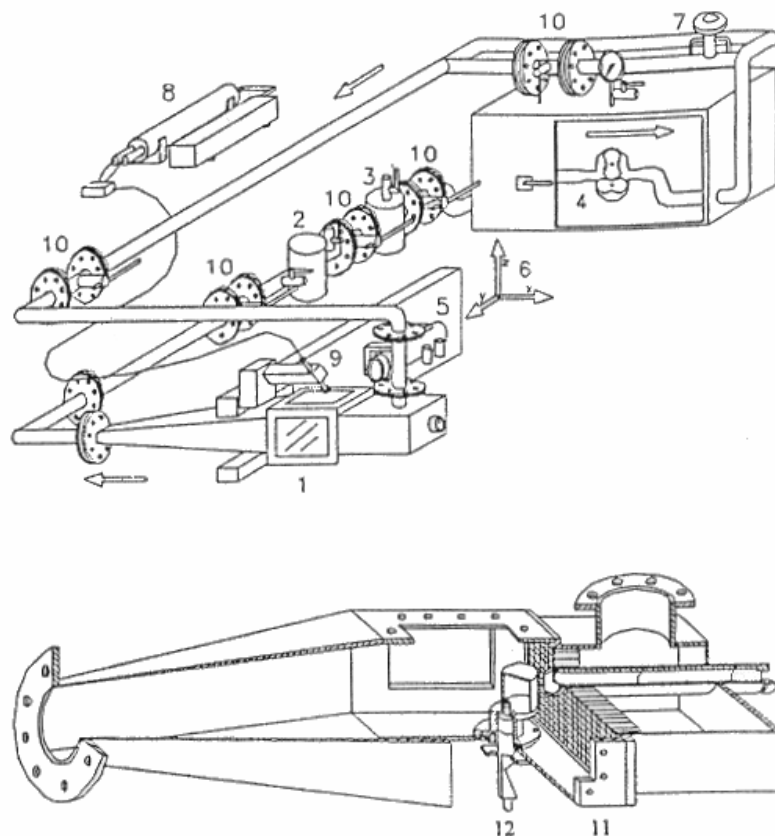


Figure 2-1 : chambre de Bae et Kang, 2000.

La chambre de Payri et *al.*, 1996.

Des chambres plus complexes ont été développées comme celle de Payri et *al.*, 1996. Elle a été utilisée dans beaucoup de travaux tels que ceux de Desantes et *al.*, 1998, Arrègle et *al.*, 1999, Pastor et *al.*, 2001. La Figure 2-2 est un schéma de la chambre Payri.



1- chambre d'injection 2- filtre centrifuge de gouttelettes 3- filtre céramique pour gouttelettes
 4- compresseur 5- optique du PDA 6- table 3D de déplacement 7- échangeur de chaleur 8- Laser
 9- optique d'émission laser 10- soupape 11- grille permettant un redressement de l'écoulement 12- injecteur

Figure 2-2 : Chambre de Payri.

La chambre est formée d'une veine aérodynamique avec circulation de gaz.

Le gaz utilisé dans cette chambre est du SF₆ : hexafluorure de soufre. Ce gaz a été choisi à cause de sa masse moléculaire et de sa viscosité qui est très similaire à ceux de l'air. A la température ambiante, le SF₆ permet des expérimentations à une densité de 30 kg/m³ pour une pression relativement basse de 0.5 MPa (ce qui équivaut à une pression azote de 2.6 MPa). De plus, il s'agit d'un gaz inerte qui n'a pas d'effets corrosifs et dont les propriétés optiques sont similaires à celles de l'air. Par contre un de ses désavantages majeurs est son coût relativement élevé.

La vitesse de circulation du gaz est de 4 m/s ce qui est suffisamment faible pour considérer que l'injection a lieu dans des conditions stables et suffisamment rapide pour nettoyer la chambre entre deux injections consécutives. Avant d'arriver dans la chambre, l'air passe à travers une grille en nid d'abeille ce qui assure un flot axial de l'entraînement du gaz et de particules de fuel et empêche ainsi toutes recirculations.

Cette chambre a trois accès optiques pour les visualisations et les mesures. Deux fenêtres opposées permettent des visualisations ombroscopiques tandis qu'une troisième placée à 90° permet des mesures PDA (110° entre l'émetteur et le récepteur).

La chambre de Fettes et al., 1999.

La chambre de Fettes et *al.*, 1999, (Figure 2-3) est une chambre de visualisation dessinée pour une pression maximale de 5 MPa et une température maximale de 525°C. Les hublots ont un diamètre de 90 mm. La pression et la température peuvent être ajustées indépendamment l'une de l'autre selon les conditions requises grâce à un régulateur de pression et quatre résistances thermiques. Le flux d'air dans la chambre est stationnaire, la vitesse de l'air est de 0.1 m/s. Cette chambre possède trois accès optiques, une fenêtre devant et deux fenêtres sur le côté.

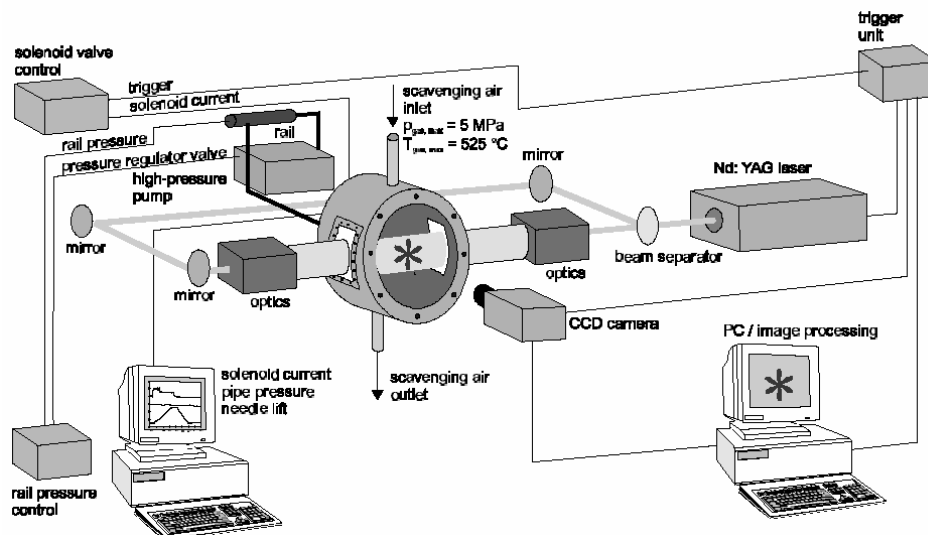


Figure 2-3 : Chambre de Fettes.

Conclusion

Ces trois chambres présentent des avantages et des inconvénients. Le système doit être modulaire afin de pouvoir disposer d'une grande souplesse dans les différentes configurations d'observation possible. Les ouvertures optiques doivent être suffisamment large pour permettre l'installation de différents systèmes optiques. Il doit être conçu pour travailler dans des conditions proches de celle rencontrées dans le cylindre, c'est-à-dire sous pression. La ventilation ou l'aspiration seront un plus pour l'élimination du brouillard formé par l'injection, l'idée d'une circulation d'air est bonne mais très contraignante au niveau de l'encombrement.

2.1.2. Les montages optiques

Nous allons présenter les trois techniques majeures existantes pour la visualisation de sprays à grand champ.

Ombroscopie

Il s'agit d'éclairer un objet par une lumière diffusante (blanche ou Laser étendu) et d'observer la lumière transmise à travers l'objet (il s'agit en fait de l'ombre de l'objet) (Figure 2-4). Cette technique est idéale lorsque l'on travaille avec un injecteur mono trou. Avec un injecteur multi trou, il est possible d'être gêné par les jets voisins, un système de déflection des autres jets doit alors être mis en place. Cette technique a été appliquée par Payri et *al.*, 1996, Bermudez et *al.*, 2003...

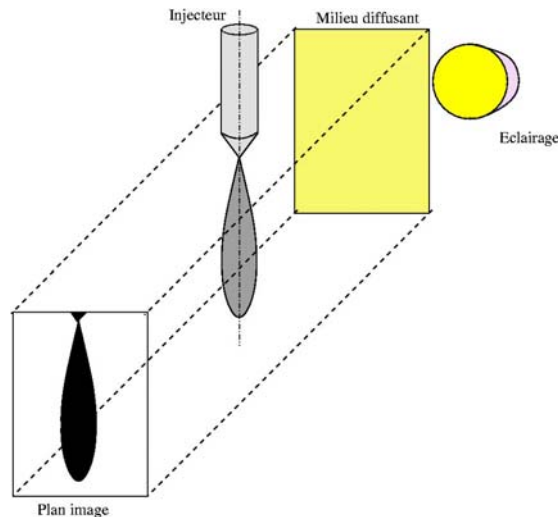


Figure 2-4 : Ombroscopie.

Tomographie

Le principe de l'éclairage tomographie est d'éclairer le jet à l'aide d'une tranche Laser passant généralement par l'axe de ce jet (Figure 2-5). Il s'agit de la diffusion de Mie. La tranche est très fine, l'épaisseur est de l'ordre de 200 μm . Sur un injecteur mono trou, le positionnement est relativement aisé par contre pour un injecteur multi trou, son positionnement est plus difficile et comme pour l'ombroscopie, il est possible d'être gêné par les autres jets (Bochard et *al.*, 2001).

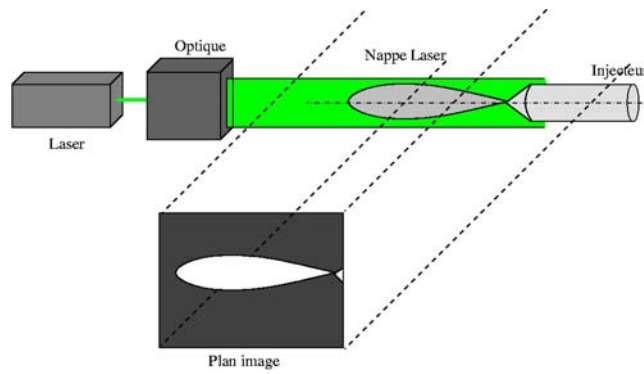


Figure 2-5 : Tomographie.

Diffusion de la lumière

Cette technique utilise le phénomène de réflexion de la lumière par les gouttelettes. Il s'agit d'éclairer les jets sur les cotés à l'aide de lampes halogènes, flash, (Delacourt et *al.*, 2003, Gavaises et *al.*, 2002) ou de faisceau Laser élargi (Fettes et *al.*, 1999) et d'observer la lumière réfléchiée par les gouttelettes (Figure 2-6).

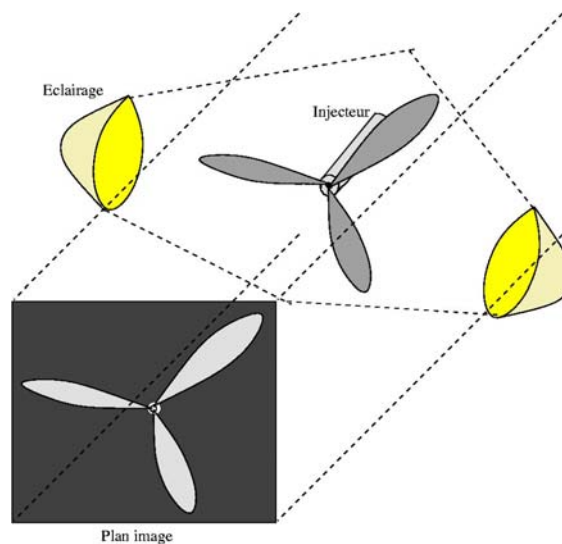


Figure 2-6 : Lumière diffusée par les gouttes.

Conclusion

Ces techniques d'observations présentent des avantages et des inconvénients. La technique d'ombroscopie et de tomographie sont applicables très facilement dans le cas d'un injecteur mono trou ne donnant qu'un seul jet. En effet le positionnement de la source de lumière blanche ou de la nappe laser est très aisé et aucun jet ne vient perturber le jet d'étude. Par contre dans le cas d'un injecteur multi trou, le repérage des trous est beaucoup moins facile et la visualisation peut se trouver perturbée par la présence des autres jets. Dans ce cas, la lumière diffusée par les gouttes semble donc la meilleure approche.

2.1.3. Mesure des paramètres et lois empiriques

Pénétration et angle du spray sont les paramètres utiles pour juger la performance des jets diesel. La longueur de pénétration dépend beaucoup du dessin et de la géométrie du moteur. Une faible pénétration a pour avantage de réduire les contacts du fuel avec les parois du cylindre mais dans les gros moteurs ceci peut empêcher l'utilisation du maximum d'air (Bergstrand et Denbratt, 2001).

Comme nous l'avons évoqué précédemment, de nombreux systèmes de caractérisations optiques existent dans la littérature. Grâce à ces systèmes de diagnostics, les chercheurs se sont attelés à la mise en place de lois régissant les grandeurs morphologiques des sprays.

Les premières investigations ont été réalisées avec des injecteurs basse pression mono trou dans un milieu à pression ambiante ou à faible densité (Kuniyoshi et *al.*, 1980). Des études plus récentes à l'aide de montage ombroscopique (Hiroyasu et Arai, 1990) montrèrent une forte dépendance de la pénétration du spray avec la pression d'injection et la pression chambre. Hiroyasu et Arai, 1990, montrèrent également que, dans un environnement de haute densité, une dispersion plus large du jet se fait avec une augmentation de l'air entraîné dans le jet. Cet entraînement a un effet direct sur la vitesse du jet et par conséquent réduit le taux de pénétration du spray et sa richesse.

A partir des années 1990, les injecteurs diesel multi trou sont apparus et différentes technologies d'usinage se sont succédées (Chapitre 1). Bae et Kang, 2000, montrèrent, en observant les jets dans leur ensemble à l'aide d'un montage par diffusion en lumière blanche, une faible variation trou à trou pour un injecteur de type VCO, par contre des variations ont été observées sur l'angle du spray avec un injecteur à sac. Au cours de cette étude, tous les trous se déchargeaient dans la chambre. De même pour Campanella et *al.*, 1994, tous les jets de l'injecteur VCO se déchargeaient dans la chambre, mais un seul jet à la fois était observé. Ils utilisèrent un montage ombroscopique. Leurs mesures ont permis d'observer des variations entre les trous de l'injecteur. Ils notèrent qu'une altération du siège de l'aiguille a une forte influence sur les performances du nez. Bae et Kang, 2000, montrèrent que l'utilisation d'une aiguille double guidée (annexe 2) réduit considérablement les variations comparée à une aiguille simplement guidée.

Beaucoup de corrélations ont été proposées dans la littérature, une revue des toutes premières d'entre elles a été réalisée par Hay et Jones, 1972. Ils montrèrent le désaccord entre toutes les corrélations proposées bien que la plupart des auteurs soient d'accord sur le fait que la pénétration dépend de la pression d'injection et de la densité du milieu ambiant et que l'angle

dépend du rapport de la masse volumique de l'huile et du milieu ambiant. Nous allons présenter les différentes lois empiriques récentes donnant la longueur de pénétration puis ensuite nous aborderons celle concernant l'angle du spray.

Loi empirique pour la pénétration du jet

L'une des premières relations empiriques pour représenter l'évolution de la pénétration du jet au cours du temps a été celle de Wakuri *et al.*, 1960 :

$$S = \left(\frac{2C_d \Delta P_l}{\rho_g} \right)^{1/4} \left(\frac{d_{inj} t}{\tan(\theta/2)} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

S étant la pénétration, C_d le coefficient de décharge, ΔP_l la différence entre la pression amont et aval, ρ_g la masse volumique du gaz dans la chambre, d_{inj} diamètre du trou d'injection et θ l'angle du jet.

Dent, 1971, a suggéré d'inclure un terme permettant de compenser les effets de la température, mais l'angle disparaît :

$$S = 3.07 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{1/4} (d_{inj} t)^{1/2} \left(\frac{294}{T_g} \right)^{1/4} \quad (2.2)$$

T_g étant la température du gaz.

Cependant les observations de Naber et Siebers, 1996, et Morgan *et al.*, 2001, montrèrent que ce terme ne compense pas parfaitement les effets de la température sur la pénétration de la phase liquide. L'étude de Hiroyasu et Arai, 1990, a conclu que la température du milieu a une influence directe sur la pénétration en réduisant celle-ci de 20% comparée à des sprays injectés dans des conditions de température ambiante, la température intervenant dans la masse volumique de l'huile et du milieu ambiant. Ils montrèrent que la pénétration après l'instant de break up dépend de la pression d'injection et de la densité du milieu ambiant sous la forme :

$$S \propto \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25} \quad (2.3)$$

Ils proposèrent alors la loi suivante :

Pour $t < t_{breakup}$:

$$S = 0,39 \left(\frac{2\Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0,5} t \quad (2.4)$$

Avec ρ_l masse volumique du fluide injecté.

Pour $t > t_{breakup}$:

$$S = 2,95 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0,25} (d_{inj} t)^{0,5} \quad (2.5)$$

Avec $t_{breakup}$ temps de break up tel que :

$$t_{breakup} = 28,65 \rho_l d_{inj} (\rho_g \Delta P_l)^{-0,5} \quad (2.6)$$

La longueur de break up, $L_{breakup}$, est alors calculée à l'aide des équations (2.4) et (2.6) tel que :

$$L_{breakup} = 15,8 \left(\sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_{inj} \right) \quad (2.7)$$

Il est important de signaler que ces relations résultent de mesures réalisées à l'aide d'un système basé sur une pompe d'injection en ligne. Les pressions d'injection de l'ordre de 20 MPa sont beaucoup plus faibles que celles du CR. Cette loi sur estime la pénétration obtenue avec des systèmes CR (Naber et Siebers, 1996 et Morgan et *al.*, 2001), En comparant nos résultats aux lois de Dent et Hiroyasu, nous avons également observé au chapitre 5 cette surestimation et verrons comment améliorer la loi d'Hiroyasu pour notre étude.

Des corrélations plus récentes ont été présentées pour les nouveaux types d'injecteur (mini sac et VCO). Arrègle et *al.*, 1999, à partir d'un montage ombroscopique, proposèrent un modèle où la pénétration dépend beaucoup plus de la densité du gaz ambiant :

$$S \propto d_{inj}^{0.370} P_{inj}^{0.262} \rho_g^{-0.406} t^{0.568} \quad (2.8)$$

Cette loi a été obtenue en recherchant les exposants qui permettent de suivre au mieux la courbe de pénétration. Elle ne conviendra donc par forcément pour un autre type d'injecteur ou un autre milieu.

Lois empiriques pour l'angle du jet

L'évolution de l'angle du jet a été étudiée au travers de plusieurs recherches. Les résultats ont montré que l'angle était influencé par la dimension du nez (Risk et Lefebvre, 1985), les propriétés du liquide (Risk et Lefebvre, 1985) que ce soit la tension de surface (Giffen et Massey, 1950), la densité ou la viscosité (Wang et Lefebvre, 1986, Giffen et Massey, 1950) et la densité du milieu dans lequel se fait l'injection (De Corso et Kemeny, 1957)

Comme pour la pénétration, différents modèles pour l'angle ont été suggérés. Au cours de l'injection, l'angle augmente très rapidement, atteint un maximum puis ensuite décroît pour atteindre une valeur constante. C'est cette valeur constante que les auteurs des modèles tentent d'évaluer.

Hiroyasu et Arai, 1980 ont proposé une première loi :

$$\theta_d = 0.025 \left(\frac{\rho_g \Delta P_l d_{inj}^2}{\mu_g^2} \right) \quad (2.9)$$

Avec μ_g viscosité dynamique du gaz.

On peut voir que cette prédiction de l'angle dépend de la viscosité du milieu ambiant. Dans l'annexe 7, nous présentons la détermination de la viscosité d'un milieu gazeux en fonction de la température en s'appuyant sur la formule de Sutherland.

Plus récemment, Hiroyasu et Arai, 1990 et Hiroyasu, 1995, proposèrent une nouvelle prédiction qui s'appuie sur la géométrie de l'injecteur et le rapport des densités de l'huile et du milieu ambiant :

$$\theta_d = 83.5 \left(\frac{l_{inj}}{d_{inj}} \right)^{-0.22} \left(\frac{d_{inj}}{d_{sac}} \right)^{0.15} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.26} \quad (2.10)$$

Avec d_{sac} diamètre du sac.

Reitz et Bracco, 1982 ont proposé une corrélation permettant de prédire l'angle du jet à partir du rapport de densité du gazole et du gaz dans la chambre. Cette loi est la suivante :

$$\tan\left(\frac{\theta_r}{2}\right) = 0.7 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad (2.11)$$

Comme pour la pénétration, Arrègle et *al.*, 1999 a donné une loi qui a été trouvée de manière empirique, mais qui n'obéit qu'à ses résultats :

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \propto d_{inj}^{0.508} P_{inj}^{0.00943} \rho_g^{0.335} \quad (2.12)$$

La communauté s'accorde à dire que l'angle du spray ne dépend pas de la pression d'injection mais des propriétés physiques de l'huile et du milieu et de la géométrie de l'injecteur.

2.2. Bibliographie sur la caractérisation des gouttelettes

La partie précédente concernait l'étude à grand champ, nous allons maintenant nous intéresser à l'étude à petit champ et la caractérisation des gouttelettes dans le spray. Comme nous l'avons vu au chapitre 1, la structure de l'écoulement interne joue un rôle important sur les

performances du spray. Des études ont été réalisées sur l'écoulement interne à la fois sur des nez à grande échelle (Soteriou et *al.*, 1995) mais aussi sur des nez de taille réelle (Badock et *al.*, 1999 ; Baz, 2003). Les effets de la cavitation à l'intérieur du nez ont été identifiés comme ayant une influence majeure sur le comportement du jet liquide et des gouttes. Bergstrand et Denbratt, 2001 ont montré qu'une réduction du diamètre de l'orifice d'injection avait une influence sur les émissions. Ceci peut être dû à une diminution de la taille des gouttes produites par des trous d'injection plus faibles. Ces plus petites gouttes se mélangent et s'évaporent plus rapidement ce qui conduit à des délais d'inflammation plus courts et à une combustion plus complète.

L'étude des gouttes est une donnée importante pour les motoristes. Nous allons exposer les différentes techniques de caractérisation des gouttelettes

La taille des gouttes influence la consommation de carburant mais également l'émission de polluants. Elle joue un rôle important sur le mélange air-carburant et par conséquent sur les performances du moteur. Pour développer des injecteurs qui permettent d'injecter le fuel dans de meilleures conditions et pour améliorer les codes de simulation numérique, il est essentiel de pouvoir mesurer et analyser le processus de pulvérisation et de désintégration des gouttelettes, de connaître leurs tailles et leurs répartitions. La conception d'un système de caractérisation de gouttelettes pourrait être intéressant pour les constructeurs automobiles.

Quelles doivent être les principales caractéristiques d'un système de mesure de gouttes :

- Capacité à travailler dans des conditions de haute densité ;
- Pouvoir réaliser des mesures dans des conditions réelles (volume et pression comparables à celle d'un cylindre moteur) ;
- Pouvoir mesurer des paramètres de gouttes en 3D.

Dans la littérature, des systèmes de mesure de taille et de répartition de gouttes pour les sprays existent et font appel à différentes techniques. Nous allons voir rapidement quelles sont ces méthodes :

- Ombroscopie (imagerie par transmission) : il s'agit de photographier avec un temps de pose suffisamment court pour figer, de manière nette, les éléments liquides qui constituent le spray. Cette technique permet de déterminer les tailles des gouttes, leurs formes et éventuellement leurs vitesses. Un des problèmes de cette technique est le défaut de mise au point, on ne s'intéressera qu'aux particules dans le même plan. Des systèmes commerciaux basés sur cette technique existent (LaVision...).

- PDPA (Phase Doppler Particule Analyser) : le PDPA utilise l'effet Doppler. Les gouttes traversent un réseau de franges lumineuses et diffuse la lumière issue de ces franges. On mesure la lumière cohérente diffusée par une particule à l'aide de photomultiplicateurs placés à différentes positions. Le déphasage entre ces signaux conduit au diamètre de la particule considérée sphérique. Egalement pour cette technique, des systèmes « clef en main » sont sur le marché (Dantec, TSI).
- Diffraction de Fraunhofer : elle permet d'obtenir la distribution des diamètres des gouttes à partir de la diffraction de la lumière (Tabata *et al.*, 1990).
- L'holographie optique sur plaque photographique : permet d'enregistrer une information en trois dimensions de l'objet observé, contrairement aux trois méthodes précédentes. Elle consiste à superposer une onde cohérente de référence à la lumière diffractée par un objet. Cela permet l'enregistrement de la phase et de l'onde de l'objet sur un capteur uniquement sensible à l'intensité. (Nishida *et al.*, 1985, 1987)

Nous présenterons plus en détails le principe d'enregistrement et de restitution des hologrammes en annexe 10.

Selon le tableau comparatif qualitatif établi par Anezaki *et al.*, 2002, sur ces quatre techniques et leurs performances, l'holographie est en très bonne position.

	Holographie optique	Enregistrement direct	PDPA	Diffraction de Fraunhofer
Diamètre minimum mesurable	3.5 μm (valeur théorique)	30 μm	1 μm ou moins	5 μm
Surface d'étude	Tout le spray	2 – 2 mm	1 goutte	\varnothing 2 mm
Analyse de la structure 3D du jet	Bon	Mauvais	Médiocre (valeur moyenne)	Mauvais
Mesure de gouttes non sphériques	Bon	Bon	Mauvais	Mauvais
Durée de la mesure	Médiocre	Médiocre	Médiocre	Bon

Tableau 2-1 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes de mesure de taille de gouttes (Anezaki *et al.*, 2002).

Les quatre techniques précédentes sont les plus usuelles, la granulométrie étant un enjeu fort dans le domaine des sprays, d'autres méthodes et systèmes sont en cours de développement, on peut notamment citer le granulomètre par imagerie développé par, Yon, 2003. Le système, tout en permettant la mesure de taille de gouttes, effectue également le positionnement des gouttes dans les trois directions et donne leurs caractérisations morphologiques.

Au cours de notre étude, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la technique d'holographie et à son extension à l'holographie numérique en s'appuyant sur le travail de Fournier, 2003.

2.3. Les méthodes de mesure du débit

Comme nous l'avons vu, dans le chapitre 1, la mesure du débit des injecteurs est une donnée importante pour la mesure de la richesse, connaissant le volume total du jet et le volume injecté à chaque instant, il est possible d'en déduire la richesse.

Dans la littérature, nous pouvons trouver plusieurs techniques permettant la mesure du débit. Chacune de ces techniques a ses avantages et ses inconvénients. Dans ce paragraphe, nous décrivons les trois techniques les plus utilisées dans les débitmètres commercialisés.

2.3.1. Le débitmètre Bosch

Le débitmètre Bosch (Bosch, 1966) a souvent été utilisé pour la mesure des débits instantanés durant l'injection. Il est constitué d'un long tube (quelques dizaines de mètres) rempli de liquide dans lequel se fait l'injection du même liquide. A la sortie de l'injecteur, un capteur de pression mesure l'onde de pression engendrée par le liquide injecté. Cette onde de pression est fonction de la vitesse de l'écoulement (Bosch, 1966) :

$$P = c_{son} \rho_l U \quad (2.13)$$

Où P est la pression, c_{son} la vitesse du son dans le liquide et U la vitesse du liquide (dans la section de passage du tube de mesure).

Par suite, le débit instantané dV/dt est donné par l'équation suivante (Bosch, 1966) :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A_{tube}}{c_{son} \rho_l} P \quad (2.14)$$

Où A_{tube} : la section intérieure du tube.

Avec cette technique de mesure, le taux d'introduction (quantité par unité de temps) peut être obtenue avec une très bonne approximation alors que la quantité totale injectée par coup obtenue par intégration, manque de précision (environ 4 %) comparée aux autres techniques de mesure de débit.

2.3.2. Methode Zeuch

La deuxième technique est la méthode de Zeuch (Bower et *al.*, 1991 ; Ishikawa et *al.*, 2000). Le principe consiste à injecter le liquide dans une chambre à volume constant remplie du même liquide. La pression dans la chambre augmente proportionnellement à la quantité injectée qui peut ainsi être détectée par la mesure de la variation de pression dans cette chambre. Ainsi, pour un volume de liquide injecté ΔV dans une chambre de volume constant V , l'augmentation de la pression de ΔP est déterminée par l'équation suivante :

$$\Delta P = B \frac{\Delta V}{V} \quad (2.15)$$

Où B est le module de Bulk du liquide.

Par suite, le débit volumique instantané dV/dt est obtenu par la différentiation de l'équation (2.15) :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{B} \frac{dP}{dt} \quad (2.16)$$

Comparée au débitmètre Bosch, la quantité injectée par cette technique est plus précise. Alors que le signal du débit instantané est plus bruité car il est obtenu par la dérivation d'un signal analogique mesuré (signal de pression).

2.3.3. Déplacement d'un piston

La troisième technique est celle développée par EFS sur le débitmètre EMI2. Son principe est basé sur l'injection du fluide dans une chambre équipée d'un piston qui se déplace sous l'action du liquide injecté. Le fonctionnement de l'EMI2 est détaillé dans l'annexe 8.

D'autres techniques de mesure de débit d'injection diesel respectivement basées sur des capteurs de débit ou sur une mesure de la charge électrique des jets peuvent être trouvées dans les références suivantes : Marcic (1998) et Shmid et *al.* (2001).

Chapitre 3. Mise en œuvre expérimentale

Les injecteurs diesel ont pour finalité de travailler dans un moteur logiquement fermé. Pour pouvoir travailler de manière non intrusive dans le but de visualiser et d'étudier les jets diesel, il faut concevoir un système permettant de simuler les conditions moteur de manière sûre.

Dans ce chapitre, nous allons présenter, dans une première partie, la chambre de contre pression que nous avons élaborée et les différents éléments composant le banc optique. Dans une seconde partie nous aborderons le principe de prise d'images et la synchronisation avec l'injection. Enfin dans une dernière partie, nous présenterons les différentes configurations réalisées pour obtenir les résultats présentés au cours de ce travail.

3.1. Définition du cahier des charges du dispositif de diagnostic

Comme nous l'avons vu dans la présentation des chambres qui nous ont inspirées, une chambre doit être modulaire, avoir des accès optiques suffisamment larges, pouvoir accepter une contre pression, disposer d'un système de nettoyage du brouillard. Ces premières considérations vont être prises en compte dans notre cahier des charges pour la définition de la chambre de pression.

Le système de diagnostic doit réaliser de façon automatique la mesure des paramètres de forme du jet (pénétration, angle, volume), mais également pouvoir fournir une richesse globale du mélange. Ces paramètres ont été définis au chapitre 1. Ultérieurement des options pourront être intégrées comme la mesure granulométrique...Le système doit pouvoir simuler les conditions moteur au moins en pression chambre.

Le système de visualisation est destiné à être implémenté de deux manières soit en tant que banc d'étude pour la recherche et développement (laboratoires de recherche universitaires ou privés) soit en tant que banc de production pour un contrôle de qualité en fin de chaîne de production. Conçu pour l'injection diesel, il est possible de l'adapter pour d'autres types d'injecteurs et de sprays.

Le système doit pouvoir être d'utilisation immédiate et ne nécessiter qu'un temps minimum de mise en fonctionnement.

Outre le système d'injection à tester et le générateur de pression, le système de visualisation proprement dit est composé de deux parties indépendantes échangeant des informations :

- La partie « matérielle » comprend une chambre d'injection, une source de lumière, des caméras et éventuellement un débitmètre.

- La partie « logicielle » comprend les logiciels de contrôle et de traitement des données.

Les expériences doivent pouvoir être réalisées dans des conditions de sécurité optimales.

La visualisation doit être assez large (diamètre de visibilité 100 - 120 mm) tout en respectant les normes de sécurité. La chambre et ses composantes devra pouvoir être utilisées dans des conditions de pression proches de celles rencontrées dans le moteur, la contre pression maximale admissible sera donc de 5 MPa.

Le système devra pouvoir accueillir différents types d'injecteurs, il faudra par conséquent réaliser différentes bagues d'adaptation. L'injecteur devra pouvoir être positionné dans la chambre de façon à optimiser l'éclairage. La fixation de l'injecteur devra par conséquent être mobile en rotation et en translation.

Un système d'évacuation et de rétention de l'huile doit être prévu. En effet, au fur et à mesure des injections, un brouillard va se former à l'intérieur de la chambre, un moyen de nettoyage devra être conçu.

Le système devra être muni d'un manomètre, d'une sonde de température, et d'une soupape de sécurité tarée à 5 MPa.

En ce qui concerne la visualisation et la mesure des paramètres, le système doit être capable de mesurer de façon automatique les paramètres morphologiques des jets présentés au chapitre 1 (pénétration, angle volume et connaissant la masse injecté, une estimation de l'évolution de la richesse). Une configuration optique parmi celles évoquées au paragraphe 2.1.2 devra être choisi de façon à pouvoir observer l'ensemble des jets.

Dans les deux parties suivantes, nous allons décrire notre système, tout d'abord la conception matérielle puis la partie logicielle.

3.2. Conception matérielle

Dans cette partie, nous allons présenter le système matériel de diagnostic optique mis en place durant ce travail. Nous présenterons les différentes solutions testées avec la chambre à pression atmosphérique et la chambre définitive à contre pression.

3.2.1. Générateur de pression

Pour la génération de la pression, nous utilisons un banc EFS (type *EFS 8178*). Il s'agit d'un banc d'essai destiné aux essais de calibrage ou d'endurance des dispositifs d'injection diesel ou essence.

Le banc est composé d'un moteur « brushless » à couple élevé, associé à un régulateur de vitesse vectoriel. Un pupitre de commande permet de piloter l'ensemble du banc : paramétrage et commande moteur, consigne de température du fluide. Ce moteur entraîne une pompe haute pression reliée à un accumulateur de grande capacité (pression maximale 160 MPa), lui-même alimentant des injecteurs électromécaniques. Nous utiliserons un injecteur mono trou à sac et deux injecteurs multi trou VCO. Les données concernant ces injecteurs sont fournies en annexe 4.

EFS propose toute une gamme de cartes électroniques de pilotage des divers éléments de cet ensemble ce qui permet de s'affranchir de l'électronique des véhicules.

La pression à l'intérieur du rail est régulée par l'intermédiaire du module de régulation pression rail **EFS 8244**. Pour son pilotage nous utilisons le logiciel *EFS WinHPR*, qui permet de donner la consigne de pression et d'effectuer la régulation.

Le pilotage de l'injection est réalisé grâce au module **EFS 8246**. Il s'agit de l'électronique de pilotage du **MIQ** (Mono Injector Qualifier) Le **MIQ** est un système de qualification mono injecteur conçu pour piloter un injecteur électrique afin de mesurer les volumes injectés « coup par coup », les mesures sont fournies par la mécanique **EMI2** (Annexe 8) lié au **MIQ**. Le module **EFS 8246** est conçu pour piloter un injecteur électrique afin de mesurer les volumes injectés « coup par coup » en passant par le module **IPOD**. Le module **IPOD** assure l'interface de puissance entre la commande logique d'injection, provenant du module **EFS 8246** et la bobine de l'injecteur. Le logiciel *WINIPOD* peut gérer tous les paramètres du module **IPOD** : courants, tensions, temps, nécessaire au pilotage correct de l'injecteur. Ces paramètres seront modifiés selon le type d'injecteur utilisé.

Le signal d'injection donné par le module **EFS 8246** sera le point de synchronisation de l'ensemble du système d'acquisition. Cette étape sera détaillée dans un paragraphe ultérieur.

Toutes les expériences ont été réalisées avec de l'huile NormaFluid BR de Shell répondant à la norme ISO 4113. Il s'agit d'une huile test pour les systèmes d'injection et dont les propriétés de viscosité et de densité sont similaires à celle du gasoil. Plus d'information concernant l'huile ISO 4113 peuvent être trouvées dans l'annexe 5.

3.2.2. Les chambres

Dans cette partie, nous allons présenter les solutions que nous avons testées. Dans un premier temps, nous avons réalisé une chambre à pression atmosphérique qui nous a servi de point de départ pour la chambre en contre pression, nous avons pu tester des solutions aux problèmes

définis dans le cahier des charges. Dans un second temps, nous présenterons très brièvement la chambre de contre pression, plus de détails sont données dans l'annexe interne à EFS.

3.2.2.1. La chambre à pression atmosphérique

Cette chambre a été le point de départ de notre étude, elle a permis d'élaborer la future chambre décrite dans le paragraphe suivant. Cette première approche a été importante pour vérifier les conditions de prise de vue, valider un certain nombre de procédés et d'algorithmes de traitement d'image, tester les champs de vision utiles, faire les premières visualisations à grand champ mais également à petit champ et se heurter à un certain nombre de problèmes tels que la formation de brouillard et l'évacuation de celui-ci.

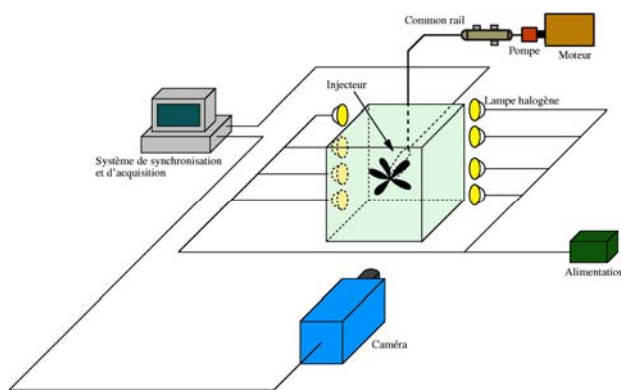


Figure 3-1 : Schéma du montage.



Figure 3-2 : Photographie de la manipulation.

La chambre est un cube dont 5 faces sont en Plexiglas transparent, seule la face avant est en verre. L'injecteur est en position horizontale. On suppose que les jets ne sont pas perturbés par la gravité. Un système d'aspiration permet d'éliminer le brouillard formé. Il est composé d'un aspirateur de VMC, avec un système de filtration pour éviter de rejeter de l'huile dans l'air. Pour la configuration optique, nous avons choisi d'utiliser le principe de diffusion de la lumière par les gouttelettes. En effet, l'ombroscopie, n'est pas envisageable car l'injecteur et son support masque une partie des jets. La tomographie non plus car nous sommes dans l'impossibilité de réaliser une coupe tomographie pour l'ensemble des jets. Par conséquent, nous avons retenu la diffusion de la lumière. Nous avons décidé d'utiliser un éclairage halogène continu formé de 8 lampes alimentées en 12V continu.

3.2.2.2. La chambre en contre pression

Pour se placer dans des conditions se rapprochant des conditions moteurs, nous avons décidé de concevoir une chambre de pression sur la base des informations obtenues avec la première chambre.

Pour la conception de cette chambre, nous nous sommes inspirés des chambres existantes dans la littérature, dont quelques exemples ont été présentés au paragraphe 2.1.1.

Les chambres disposant d'une ventilation sont généralement très encombrantes comme on peut le voir avec celle de Payri (Figure 2-2), de plus les cylindres ou moteurs transparents nécessitent une infrastructure lourde pour l'échappement des gaz brûlés et la mise en fonctionnement du moteur. Notre système doit pouvoir être placé aussi bien dans une entreprise que dans un laboratoire de recherche et doit pouvoir être relativement compact.

Le fait de monter à 5 MPa de pression dans la chambre est un problème en soit, ceci impose une conception renforcée et des procédés de fabrication rigoureux. Il a fallu obéir à la norme sur les équipements sous pression (annexe 9).

La Figure 3-3 représente la conception 3D (Figure 3-3 (a)) de la chambre et sa réalisation concrète (Figure 3-3 (b)).

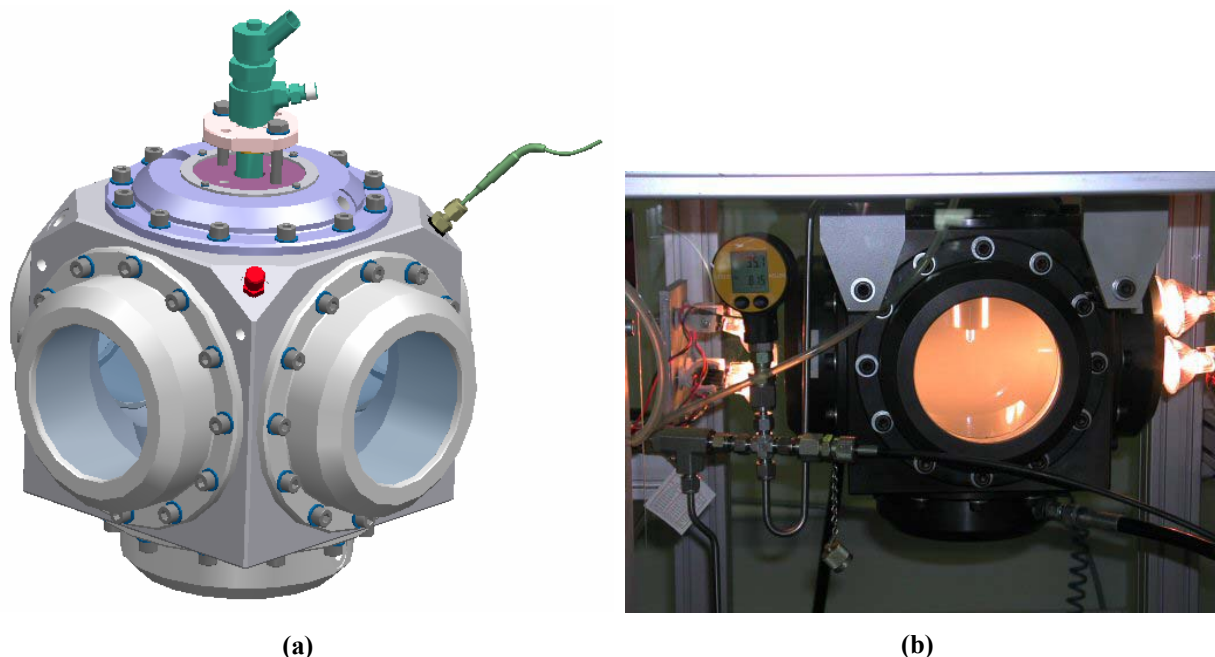


Figure 3-3 : Cellule de visualisation.

La description complète des différents éléments de la chambre est donnée dans une annexe interne à EFS.

La chambre qui a été réalisée, testée et améliorée au cours de ces trois années, répond au cahier des charges initial. Elle est formée d'une cavité en acier avec cinq hublots de

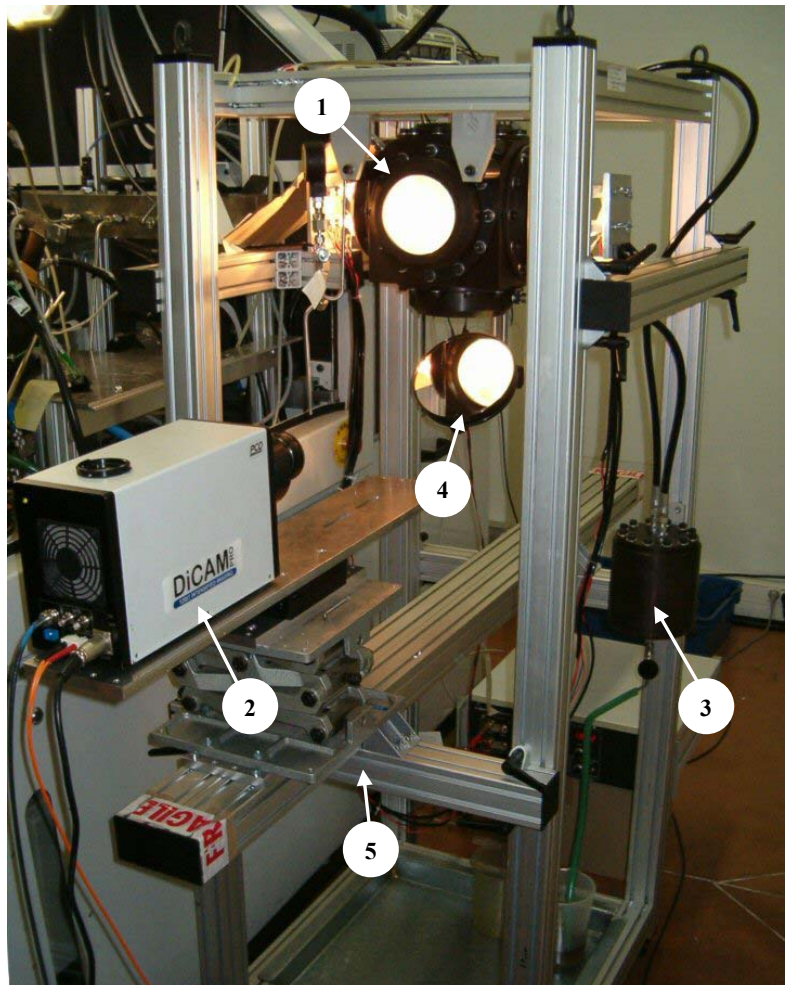
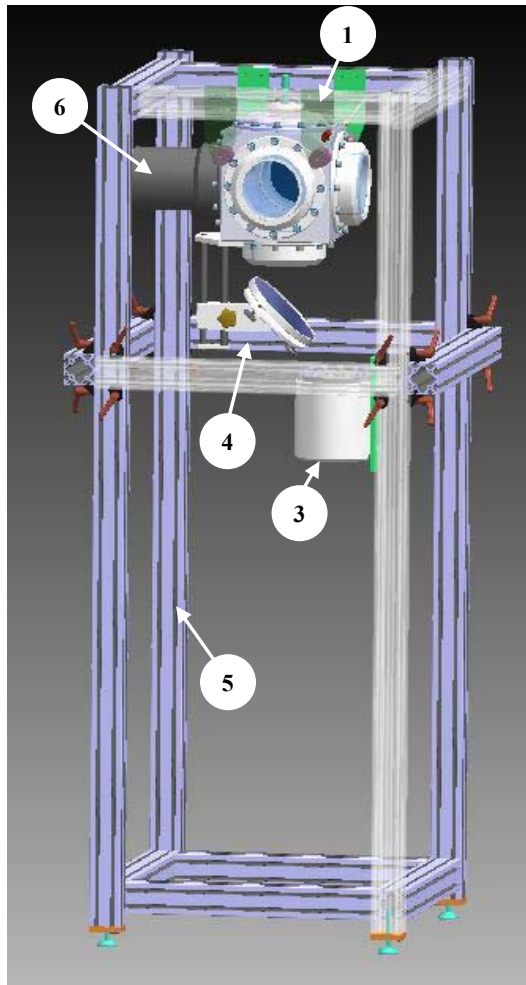
visualisation et un système de support d'injecteur. Un système de récupération d'huile (cuve de rétention) et d'extraction du brouillard a été mis en place (Figure 3-4, respectivement élément 3 et 6).

Les différentes configurations optiques seront présentées dans le paragraphe 3.4. Pour le système à grands champs nous utiliserons une configuration similaire à celle employée avec la chambre à pression atmosphérique, c'est-à-dire un éclairage en lumière blanche et l'observation de la lumière diffusée par les gouttelettes. C'est cette configuration qui est présentée Figure 3-4, la caméra (Figure 3-4, élément 2) est en position horizontale, l'image est renvoyée par un miroir (Figure 3-4, élément 4)

Notre but avec ce système est de réaliser une installation peu encombrante et modulaire. L'ensemble de la chambre est monté sur un support composé de différents rails en aluminium ce qui permet une très grande modularité et un très grand choix de fixation (Figure 3-4, élément 5). Différents rails permettent de supporter l'éclairage, les caméras, et autres instruments.

La caméra est placée sur un système de déplacement 3D. Elle peut se déplacer suivant les 3 directions. Ce système est surtout utile si on utilise un microscope longue distance pour des observations microscopiques. Le déplacement en x est assuré par la rainure centrale du rail, le déplacement en y est assuré par une platine de translation et la translation en z est assurée par un support élévateur. Ces déplacements sont, dans un premier temps, manuels, ils pourront, par la suite, être réalisés à l'aide de moteurs pas à pas pilotés par une interface de contrôle.

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 3-4, l'installation ne se trouve pas à l'intérieur de la cabine du banc d'essais, mais déportée. L'injecteur est relié au rail par l'intermédiaire d'un tube haute pression de 80 cm de long, des pertes de charge ont lieu dans ce tube, la pression au niveau de l'injecteur est donc plus faible qu'au niveau du rail. Dans notre étude, nous ne tiendrons pas compte de cette chute de pression et nous supposerons que la pression injecteur est équivalente à la pression rail.



1- Chambre de pression 2- Caméra 3- Cuve de rétention 4- Miroir 5- Châssis en rail aluminium 6- Extracteur de brouillard

Figure 3-4 : Montage complet.

3.2.3. Banc optique : source lumineuse, caméras, microscope

Pour l'acquisition de l'ensemble de nos images, nous utilisons des caméras de type CCD (Charged Couple Device). Nous avons préféré l'utilisation de caméras CCD aux caméras à film argentique pour de multiples raisons (maniement des films délicat, faible capacité d'enregistrement, coût de développement des films et donc des contraintes sur la qualité de développement non garantie, numérisation des films, etc...). Cependant, l'utilisation d'une caméra vidéo rapide pose d'autres problèmes puisque le temps d'injection très court ($\sim 1 - 2$ ms) ne permet pas la visualisation, avec une bonne résolution, du développement complet des jets sur une seule injection à l'aide des caméras actuelles. C'est pourquoi l'expansion du jet est reconstituée à partir d'une succession de clichés obtenus, dans les mêmes conditions expérimentales, sur plusieurs injections à un glissement temporel près. La viabilité de cette démarche a été démontrée grâce à une très bonne répétabilité des résultats.

3.2.3.1. Les différentes sources d'éclairage

Nous allons utiliser deux sources d'éclairage différentes selon le type d'investigation.

Pour l'étude morphologique des jets, nous avons opté pour un éclairage en lumière blanche à l'aide de lampes halogènes 12V 50W alimentées en continu. L'éclairage se fait à travers 2 hublots et nous avons disposé 4 lampes par hublots.

Pour l'investigation microscopiques nous avons utilisé un laser Nd :Yag à 532 nm pulsé de chez Quantel. La longueur du pulse est de 7 ns.

3.2.3.2. Les caméras

Les caméras CCD sont constituées d'un ensemble de capteurs (pixels) transformant les photons lumineux en charge électrique. L'ensemble forme une matrice de pixels jointifs permettant la discrimination physique des points d'une image. Les images numériques sont immédiatement enregistrées sur un ordinateur pour le traitement afin d'obtenir l'information. Ces caméras peuvent être intensifiées, en effet l'intensificateur a pour rôle d'amplifier le signal lumineux restitué par le capteur, de réduire le temps d'exposition d'image de quelques microsecondes à quelques centaines de nanoseconde. Il a pour inconvénient d'augmenter le bruit de fond des images enregistrées.

Caméra Dicam Pro PCO

Notre source lumineuse étant dans le cas de la visualisation grand champ des lampes halogènes 12 volts 50 watt, alimentées en continu, nous sommes limités en énergie lumineuse. C'est pourquoi nous avons choisi pour cette configuration d'utiliser une caméra CCD intensifiée DicamPro de chez PCO. Les caractéristiques de cette caméra sont les suivantes :

- Résolution du capteur CCD : 1280×1024 pixels.
- Taille des pixels : $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$.
- Double obturation pour la prise de doublets d'images : le temps minimal entre les deux images est de 500 ns.
- Court temps d'exposition d'images : minimum de 3 ns en simple obturation et 20 ns en double obturation.
- Résolution de 12 bit : ce qui fait 4096 niveaux de gris.
- Fréquence d'acquisition maximale : 7 Hz en simple obturation et 3 Hz en double obturation

Caméra Flowmaster LaVision

Cette caméra est très semblable à la caméra précédente sauf qu'elle n'est pas intensifiée et ne dispose pas d'une double obturation. Elle sera utilisée principalement avec un éclairage plus intense, par exemple avec un laser Yag pulsé, c'est-à-dire pour notre étude à petit champ.

Les caractéristiques de cette caméra sont les suivantes :

- Résolution du capteur CCD : 1280×1024 pixels.
- Taille des pixels : $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$.
- Le temps minimal entre les deux images est de 500 ns.
- Court temps d'exposition d'images : minimum de 3 ns en simple obturation et 20 ns en double obturation.
- Résolution de 12 bit : ce qui fait 4096 niveaux de gris.
- Fréquence d'acquisition maximale : 7 Hz en simple obturation et 3 Hz en double obturation

3.2.3.3. Les microscopes longue distance

Pour la visualisation des phénomènes microscopiques, il est nécessaire d'utiliser un objectif optique avec un haut coefficient d'agrandissement. Au cours de nos expérimentations, nous allons utiliser deux types de microscope longue distance :

- Le microscope longue distance Questar QM1.

La taille des objets observés varie en fonction des dimensions du champ de visualisation désiré et en fonction de la résolution en pixel de la caméra qui enregistre les images. La taille de champ varie de $5.5 \times 7 \text{ mm}$ pour une distance minimale de travail de 53.5 cm à $19.5 \times 24.5 \text{ mm}$ pour une distance maximum de travail de 2m.

Cet objectif sera utilisé principalement pour des observations à petit champ lors d'expérimentations d'ombroscopie. En holographie numérique, cet objectif ne pourra être utilisé à cause du miroir secondaire. En effet en holographie numérique, le faisceau de référence collimaté doit éclairer le capteur après la traversée de l'objectif. Ceci n'est pas vérifié dans cette configuration.

- Microscope longue distance tube Optem Zoom 70.

Cet objectif n'est formé que de lentilles. Nous avons montré que cet objectif convient pour l'holographie numérique car on peut se placer à une certaine distance de l'écoulement tout en ayant un grandissement convenable (voir Chapitre 4).

3.3. Acquisition automatique des images

Dans ce paragraphe, nous allons montrer comment nous avons procédé pour l'acquisition des images et l'acquisition de séquence d'images.

3.3.1. Acquisition d'une image

Comme nous l'avons dit précédemment, le module de pilotage **EFS 8246**, permet de contrôler la durée d'injection et la fréquence d'injection. Il envoie le signal de commande à l'injecteur par l'intermédiaire du module **IPOD**. Ce signal de commande est récupéré par la sortie TTL « cominj out » du module **EFS 8246**. Ce signal que nous appellerons « signal de départ de l'injection » ou « Injection Control Signal » (ICS) est un bon indicateur de « début de l'injection » : « Start Of Injection » (SOI) qui est pris comme l'instant où la première goutte sort de l'injecteur.

Comme le montre la Figure 3-5, il existe un délai entre le ICS et le SOI. Ce délai est appelé « Needle Opening Time Delay » (NOTD). Différentes études réalisées par Baz, 2003, avec un injecteur instrumenté ont montré que l'ouverture et la fermeture de l'aiguille exigent quelques centaines de microsecondes qui sont dues, respectivement, au temps de vidange et au temps de remplissage en liquide de la chambre de pression lors de l'activation et la désactivation de la commande électrique du solénoïde de l'électro-injecteur. Il en résulte des retards entre l'ICS et le début de la levée de l'aiguille et donc le SOI et d'autre part entre l'arrêt du signal d'activation et la fermeture complète de l'aiguille.

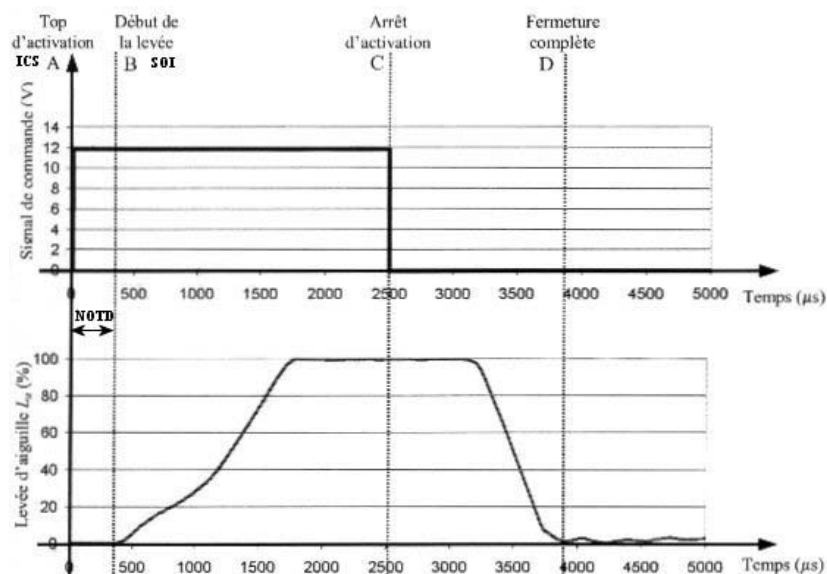


Figure 3-5 : Exemple des retards entre le signal de commande électrique de l'électro-injecteur et le signal de la levée d'aiguille ; P_{inj} : 50 MPa, CP : 1 MPa, t_{inj} : 2.5 ms (Baz, 2003).

Pour la synchronisation de la prise d'image, nous utilisons le signal de ICS que nous envoyons sur l'entrée de déclenchement de la caméra. La caméra dispose de fonctions permettant de générer des délais. Nous entrevoyons ici, la possibilité de mesurer le NOTD pour n'importe quels injecteurs sans l'instrumenter, juste en utilisant un système de vision. Nous présenterons cette exploitation dans le chapitre 5 dans notre étude des visualisations microscopiques.

3.3.2. Acquisition d'une séquence d'images

Comme nous l'avons vu précédemment, l'injection est un phénomène très rapide de l'ordre de 1 à 2 ms. La caméra utilisée ne permet d'acquérir qu'au maximum deux images par injections séparées par un délai connu. Par conséquent, l'étude de l'évolution de l'injection pour un injecteur donné avec des paramètres donnés comme la pression d'injection, la contre pression ou la durée d'injection, ne peut être fait que de fait de manière statistique.

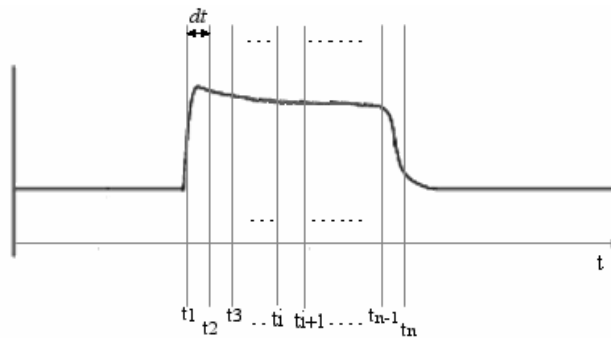


Figure 3-6 : Levée d'aiguille et instant d'acquisition d'images.

L'injection est découpée en incréments de temps constants dt_i comme le montre la Figure 3-6. Comme l'injection n'est pas un phénomène rigoureusement reproductible, pour chacun des N instants t_i , n images sont acquises, ainsi $N \times n$ images sont donc être acquises.

L'acquisition automatique est réalisée grâce à un logiciel de pilotage de la caméra que nous avons spécialement développé. En paramètres d'entrée, l'utilisateur doit fournir, l'instant de départ, le nombre d'instants et le temps entre deux instants, le nombre d'images par instant. Le logiciel acquiert l'ensemble des images. Les images sont stockées dans un répertoire spécifique et une image moyenne pour chaque instant est réalisée.

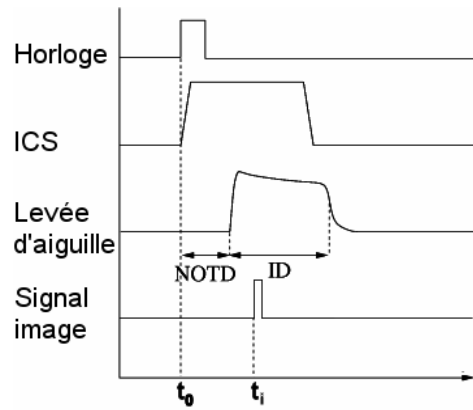


Figure 3-7 : Chronogramme pour la prise d'une image.

Pour réduire le temps d'acquisition, nous utilisons la possibilité de la caméra de prendre deux images consécutives par injection. A partir du ICS, pour chaque injection, la caméra est déclenchée deux fois avec deux délais ajustables, le premier délai « First Frame Delay » (FFD) et le second délai « Second Frame Delay » (SFD), où $SFD = FFD + dt$. Ainsi pour chaque incrément, m injections successives sont réalisées et les images correspondantes sont enregistrées à t_i et à t_{i+1} (Figure 3-8). Une fois l'ensemble des images acquises pour ces deux séries, on se déplace de l'incrément $2dt$, on obtient les deux séries suivantes à l'instant t_{i+2} et t_{i+3} et ainsi de suite. Avec le mode pair d'image de la caméra, le temps d'acquisition est par conséquent divisé par deux.

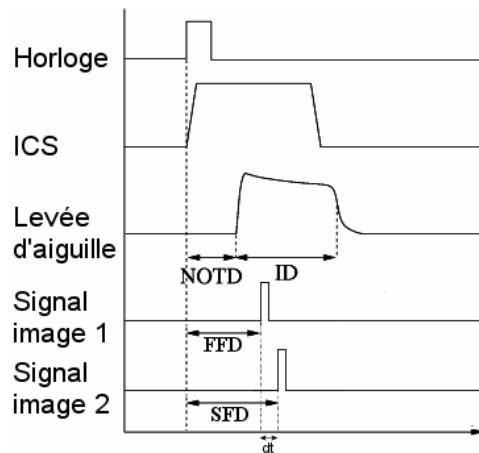


Figure 3-8 : Chronogramme pour la prise d'un doublet d'images.

3.4. Les installations complètes de visualisation

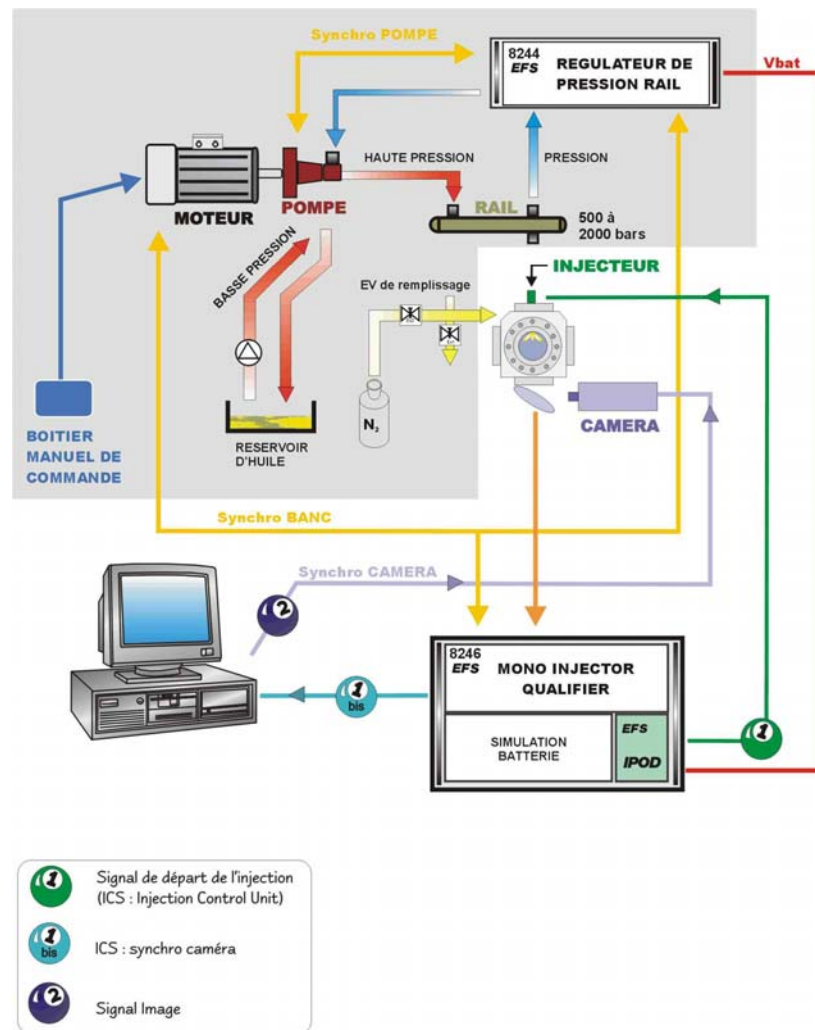


Figure 3-9 : Synoptique matériel de l'installation.

Trois systèmes physiques ont été développés selon l'objectif poursuivi : analyse grand champ pour la morphologique globale, ou petit champ microscopique au voisinage de la sortie de l'orifice d'injection. Ces systèmes comprennent tous un éclairage, une caméra de prise d'images, un logiciel d'acquisition et traitement de celles-ci. La Figure 3-9 représente le synoptique de l'installation générale, il est présenté pour le système d'analyse macroscopique des jets, mais peut se décliner sur le même principe pour les analyses microscopiques.

3.4.1. Installation de visualisation en grand champ

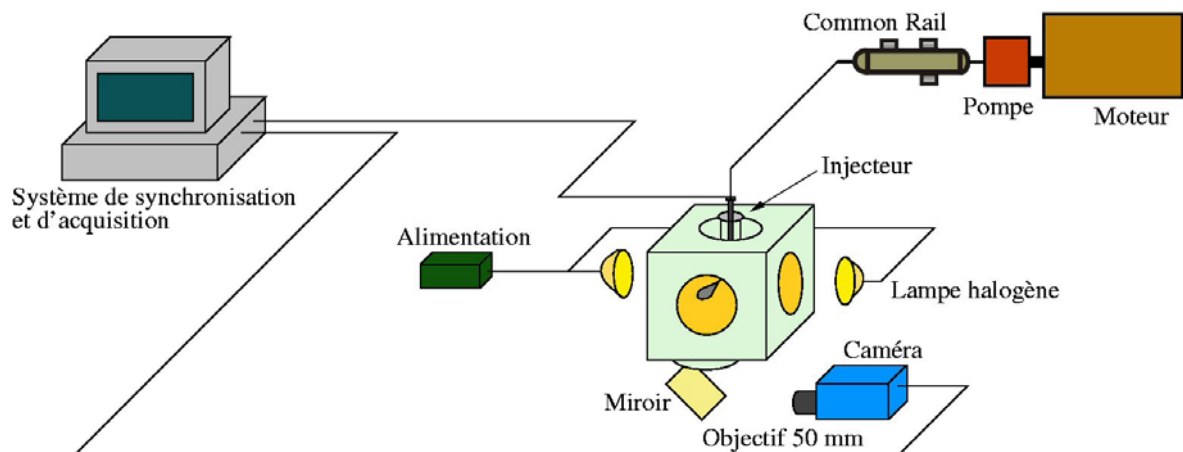


Figure 3-10 : Montage expérimental chambre sous pression.

Dans cette installation, nous utilisons un éclairage en lumière blanche assuré par un ensemble de 8 lampes halogènes 50 W alimentées en 12V continu. Deux hublots servent pour l'éclairage (quatre lampes par hublots). Lors d'une injection, la lumière incidente ne rencontrant pas de gouttelettes est absorbée par le fond noir de la chambre. La lumière reçue par la caméra est alors essentiellement composée de la partie réfléchiée par les gouttelettes. Nous observons la lumière diffusée par les gouttelettes (Figure 2-6).

L'injecteur est monté en position verticale. Dans un moteur pour des raisons de conception, l'injecteur doit être soit en position vertical soit oblique, la géométrie de la buse est dans ce cas différente selon le positionnement de l'injecteur.

Le nez de l'injecteur est placé au centre de la cavité. Le hublot de dessous sert à la visualisation. L'image est renvoyée par un miroir positionné à 45° sur le capteur de la caméra.

3.4.2. Installation de visualisation en petit champ

Les installations suivantes ont pour but d'étudier les sprays issus d'injecteurs diesel haute pression à petit champ. Nous avons utilisé deux techniques d'étude, une nouvelle technique : l'holographie numérique qui permet une étude d'un volume, et la technique ombroscopique. Pour ces deux études, le montage est très similaire.

La source lumineuse est un laser Nd :YAG à 532 nm de longueur d'onde. Le laser est placé sur un support élévateur en z et sur un platine de translation en x .

Pour l'acquisition des images, nous utilisons une caméra Flowmaster 3 de chez LaVision. Le montage diffère au niveau des objectifs microscopes longue distance utilisés et du filtrage de la source lumineuse. La caméra est placée sur un système de translation à 3 dimensions.

3.4.2.1. Installation pour l'holographie numérique

Comparées aux méthodes d'observation classiques, la méthode d'holographie permet d'observer une région en volume comme nous l'avons vu au chapitre 2 et annexe 10.

Dans le cadre de l'application de l'holographie numérique à l'analyse de jet diesel, nous avons utilisé un montage holographique en ligne (Figure 3-11), comportant une caméra Flowmaster 3 et un objectif microscope longue distance (Optem 70) de manière à pouvoir ajuster le champ. Dans nos expérimentations, nous avons travaillé avec une résolution de 3 μm par pixel.

A la sortie du laser le faisceau est étendu à l'aide d'un extenseur de faisceau. Le faisceau a alors une taille de l'ordre de 20 mm de diamètre. Afin de diminuer la puissance du faisceau laser nous utilisons deux polariseurs. L'intensité lumineuse est alors facilement réglable.

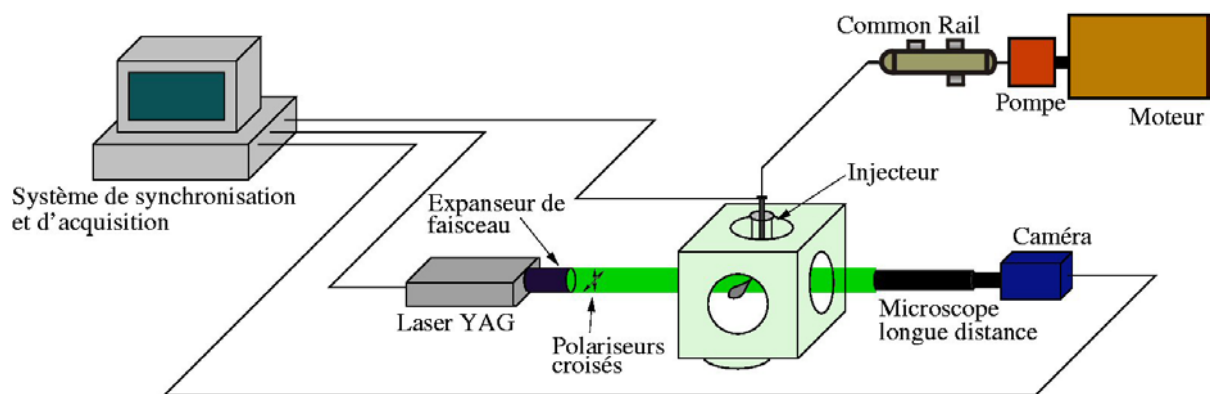


Figure 3-11 : Montage expérimental pour l'holographie numérique.

3.4.2.2. Installation pour la visualisation du début et de la fin d'injection

Pour cette étude, nous utilisons une variante du dispositif décrit précédemment (Figure 3-12). On se place en ombroscopie. La source de lumière n'est plus cohérente mais diffusante.

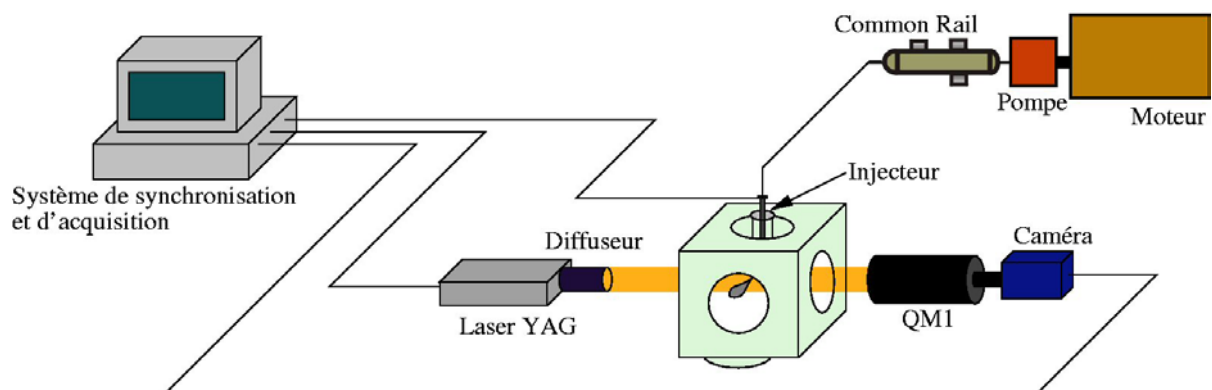


Figure 3-12 : Montage expérimental pour l'ombroscopie.

En sortie du Laser, l'élargisseur de faisceau est toujours présent mais accouplé à un système diffusant.

La mise au point est réalisée sur l'objet observé.

L'observation se fait avec la même caméra décrite précédemment couplée au microscope longue distance QM1. Le champ observé est de $3,7 \times 3$ mm, soit une résolution du $3\mu\text{m}$ par pixel.

Le but de cette manipulation est d'observer de très petits champs autour du nez de l'injecteur. Il sera entre autre possible d'observer l'évolution du jet au début et en fin d'injection. Un protocole de détermination du début de l'injection pour les injecteurs a également été mis en place. Nous pourrons également étudier l'angle microscopique des jets

Chapitre 4. Le traitement d'images

Le chapitre 3 a permis de présenter les différents bancs de visualisation et d'acquisition d'images que nous avons mis en place et utilisés au cours de ce travail. Il faut maintenant pouvoir traiter ces images afin d'en retirer les informations relatives :

- soit à la morphologie des sprays (pénétration, angle, volume) grâce au système automatique.
- soit à des aspects plus délicats à mettre en évidence comme la taille ou la répartition des gouttes ainsi que le tout début de la formation du spray au voisinage de l'orifice.

Ce chapitre va se découper en deux parties. Une première partie abordera le problème de traitement des images à grand champ afin d'obtenir les paramètres morphologiques des sprays et ce de façon automatique. Le système ayant une finalité industrielle, il faut que le logiciel de traitement d'images dispose d'une méthode de segmentation robuste et sans intervention de l'utilisateur ainsi que d'une vitesse de traitement relativement élevée. Une seconde partie sera consacré à une étude de champ microscopique et aux traitements des hologrammes correspondants.

4.1. Méthodes de segmentation d'images

Les images obtenues à grands champs représentent l'évolution des sprays issus d'un injecteur diesel haute pression multi trou. Le traitement de ces images a pour but final l'obtention des paramètres morphologiques définis sur les jets au chapitre 1 (pénétration, angle, volume). Ainsi la première étape du traitement consiste à segmenter les jets c'est-à-dire à déterminer le contour ou la frontière de chacun d'eux (Figure 4-1). Connaissant ensuite la position du nez de l'injecteur (nous verrons comment la déterminer dans cette partie), nous pouvons facilement obtenir les résultats escomptés.

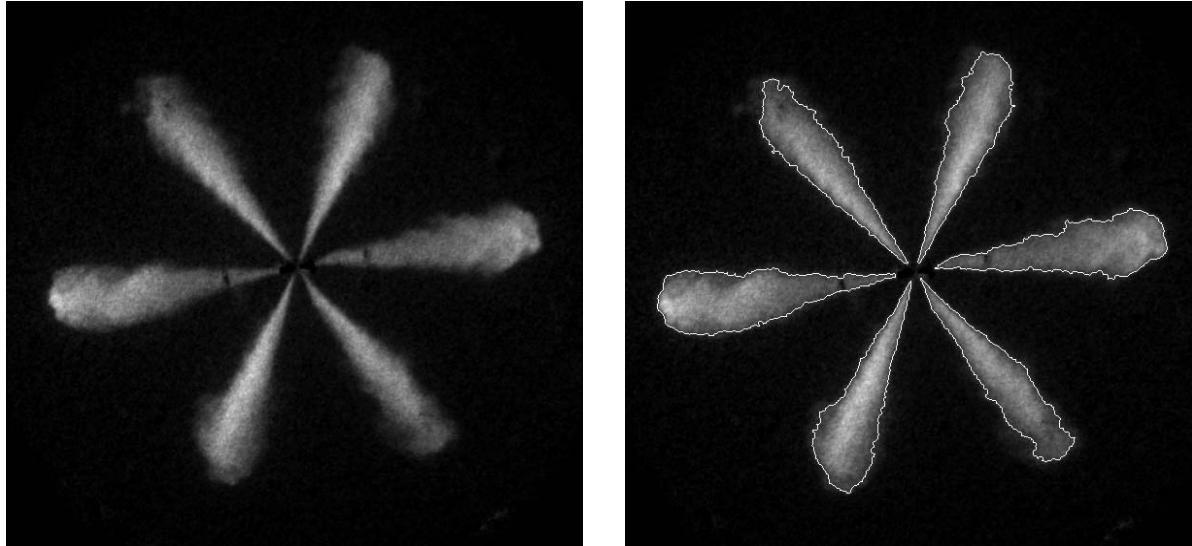


Figure 4-1 : Exemple de détection de contour.

Compte tenu du fait que le spray est un milieu à deux phases, la difficulté est donc de répondre à la question suivante : comment définir la notion de frontière du jet ? En choisissant une mauvaise frontière, la mesure de l'angle du jet peut être faussée. Hors l'angle est une donnée majeure pour les modèles numériques de jet (Schil, 1996).

Nous avons étudié plusieurs méthodes de segmentation et leurs adaptations à la mesure des paramètres des jets. Nous allons présenter succinctement chacune de ces méthodes, leurs applications à la segmentation sur un modèle synthétique de jet et leurs applications à un jet réel. Après avoir fait une synthèse des résultats, nous présenterons ensuite l'algorithme qui a été retenu pour la mesure des paramètres morphologiques.

Avant de présenter les méthodes étudiées, nous ferons une revue des méthodes classiques de segmentation en précisant celles qui ont été appliquées à la segmentation des jets. Ce paragraphe sera donc organisé de la manière suivante : dans une première partie, nous présenterons une revue bibliographique, puis une adaptation des principales méthodes à la segmentation de jets, enfin nous présenterons la méthode retenue.

4.1.1. Bibliographie sur les différentes méthodes de segmentation des jets

L'un des grands problèmes du traitement d'image est de trouver une méthode permettant de segmenter n'importe quels types d'images de façon automatique, c'est-à-dire sans intervention humaine. Cet objectif est quasi impossible à tenir compte tenu du fait que les images sont toujours différentes les unes des autres.

Un grand nombre de techniques de segmentation plus ou moins sophistiquées existent dans la littérature (Jain, 1986 ; Pratt, 1994 ; Castleman, 1996). La plupart sont résumées et discutées dans plusieurs revues (Pal et Pal, 1993) mais aucune n'est assez robuste pour être appliquée à n'importe quelle image.

Elles peuvent être regroupées en deux types d'approche :

- *L'approche région* : une image est découpée en différentes régions ou classes. Pour chacun des pixels, il faut décider ou estimer à quelle classe il appartient. Ces régions sont déterminées en fonction de leurs propriétés intrinsèques, par exemple, en groupant des pixels voisins de niveaux de gris similaires.
- *L'approche contour* : on s'attache à détecter les contours des différentes régions de l'image par une variation rapide du niveau de gris des pixels. Cette variation rapide peut être détectée numériquement par le passage par un maximum de la dérivée première ou le passage à zéro de la dérivée seconde.

La plus simple des méthodes de l'approche région est la méthode de seuillage à deux classes. Dans cette méthode, les pixels dont le niveau de gris est supérieur à une valeur seuil sont considérés comme appartenant à la première classe (celle de l'objet à détecter) alors que tous les autres sont considérés comme appartenant au fond.

Dans la plupart des études publiées sur la segmentation des jets, très peu de détails sont donnés concernant le choix du seuil. Si l'on utilise un seuil fixe, celui-ci doit être choisi comme la valeur, pour laquelle le plus grand nombre d'images étudiées, donnent un contour qui semble suivre la frontière du jet (on voit qu'ici, il y a intervention humaine, le contour est déterminé selon l'appréciation visuelle de l'utilisateur).

Des méthodes avec des seuillages adaptatifs ont été employées en prenant comme valeur de seuil 20% de la valeur moyenne de l'intensité dans le spray liquide (Verhoeven *et al.*, 1998). Cette procédure sous estime généralement la surface du jet traité, surtout si le bruit sur l'image est non négligeable. De plus, après un prétraitement visant à l'amélioration de cette image, les variations d'illumination et l'encrassement des fenêtres entre les différents tirs ne peuvent être complètement pris en compte et par conséquent l'incertitude sur les résultats est très grande.

Peu de travaux font état d'études sur les méthodes de seuillage automatique plus élaborées. Certains tel que Bae *et al.*, 2002 utilisent un seuil variable estimé automatiquement sur chaque image à partir de l'histogramme. Pastor *et al.*, 2001, ont utilisé une variante de cette méthode sur des images provenant d'un capteur couleur de faible résolution. Leur seuillage utilisaient les 3 canaux R, G et B.

Pour l'approche contours, la méthode de référence a été proposée par Canny, 1986. Son principe consiste à détecter les contours comme les maxima du gradient. Elle a été utilisée par Pastor et *al.*, 2001. Pour l'analyse des objets diffus comme les jets, les résultats obtenus présentent souvent des contours non fermés. On peut alors appliquer un algorithme de fermeture des contours ou utiliser des approches multi-échelle (Lindberg, 1998; Fayolle, 1998 ; Ducottet, 2004) qui donnent d'assez bon résultats.

Une approche récente de détection de contours utilise l'information donnée par la divergence de Jensen - Shannon des histogrammes de deux sous fenêtres qui ensemble forment une fenêtre glissante permettant de sélectionner des maximums de divergence locaux comme points de contours (Luque Escamilla et *al.*, 2002). L'inconvénient de cette méthode est la difficulté d'ajustement des paramètres.

4.1.2. Etude des différentes méthodes

Dans cette partie, nous allons présenter différentes méthodes de segmentation permettant d'obtenir les contours des jets. Ces méthodes seront appliquées à des images synthétiques (Figure 4-2 (a)) puis à des images réelles (Figure 4-2 (b)).

Les images synthétiques sont obtenues à partir de triangles. Les 5 triangles sont identiques avec un angle d'ouverture de 30° et une hauteur de 226 pixels. L'image obtenue est ensuite lissée à l'aide d'un filtre moyenneur (3×3) sur laquelle nous avons ensuite ajouté un bruit gaussien défini par l'équation suivante :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

μ étant la moyenne et σ l'écart type.

L'écart type a été fixé à 0.5.

Cette image synthétique (Figure 4-2 (a)) peut être assimilée à un jet bien développé ($t = 1000 \mu s$ après SOI). De cette image, nous avons créé deux autres images pour simuler des instants plus proches du début de l'injection (Figure 4-3 (a) à $t = 100 \mu s$ après SOI et Figure 4-3 (a) à $t = 300 \mu s$ après SOI).

Dans notre étude les images synthétique et réelle ont la même résolution c'est-à-dire qu'un pixel correspond à $150 \mu m$.

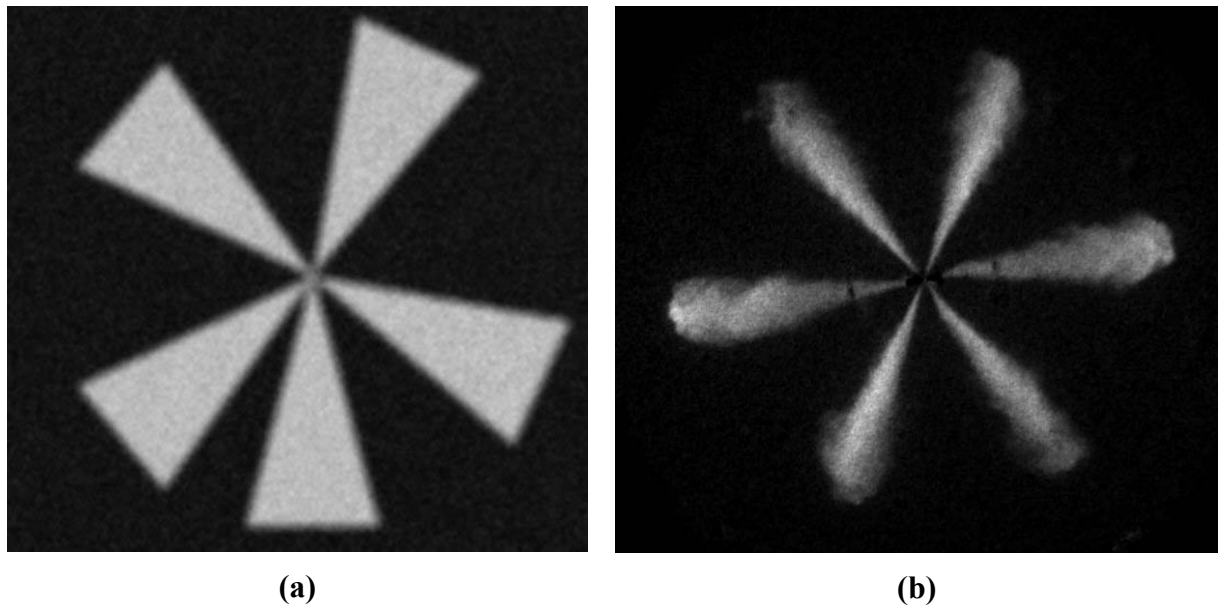


Figure 4-2 : (a) Image de synthèse, (b) Image de jet.

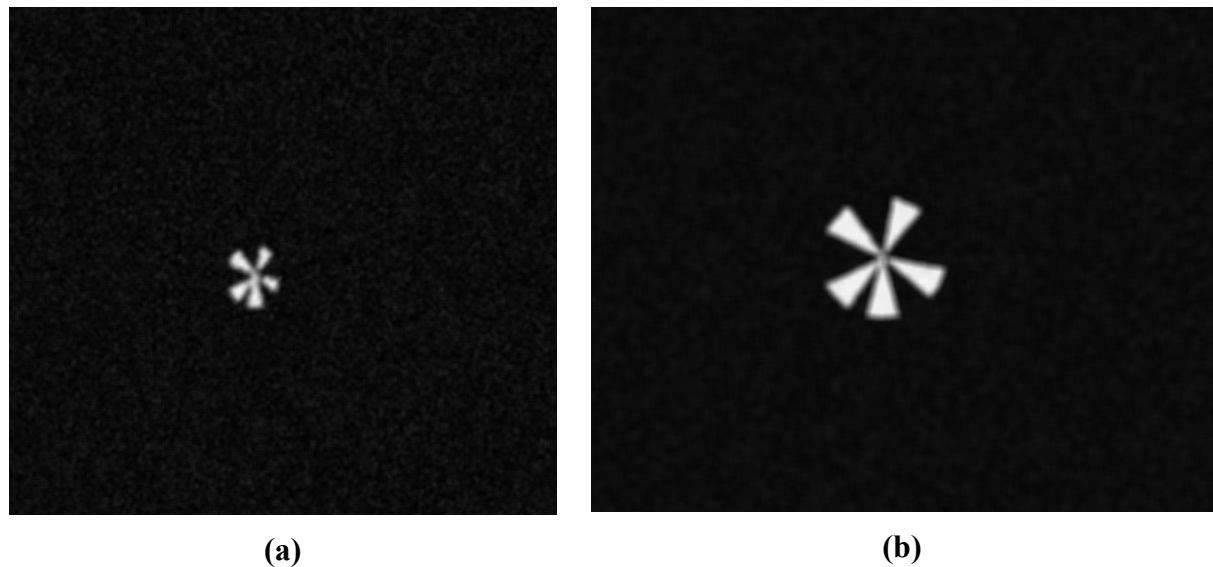


Figure 4-3 : Images synthétiques de jet au début de l'injection : (a) $t = 100\mu s$ après SOI, (b) $t = 300\mu s$ après SOI.

Dans un premier temps, nous allons présenter une détection de contour à base de seuillage ainsi que des résultats puis nous verrons deux techniques à base de gradient avec des résultats.

4.1.2.1. Seuillage

Définition et notations

L'opération de seuillage de base est la binarisation d'une image. Si l'image est constituée de pixels clairs représentant le jet ou les jets et que les pixels sombres représentent le fond (l'inverse est bien entendu complètement envisageable), le seuillage donnera une image à deux niveaux représentant le jet en blanc et le reste de l'image en noir. De manière générale,

le seuillage permet la segmentation en un nombre distinct de niveaux chacun associé à différents états physiques dans l'image. La principale difficulté est la détermination du (ou des) niveau(x) de seuil, c'est-à-dire les niveaux qui définissent la frontière entre les états physiques. Considérons le cas du seuillage binaire, le niveau de seuil s^* peut être fixé de manière arbitraire mais il est, le plus souvent, déterminé à l'aide de l'histogramme des niveaux de gris.

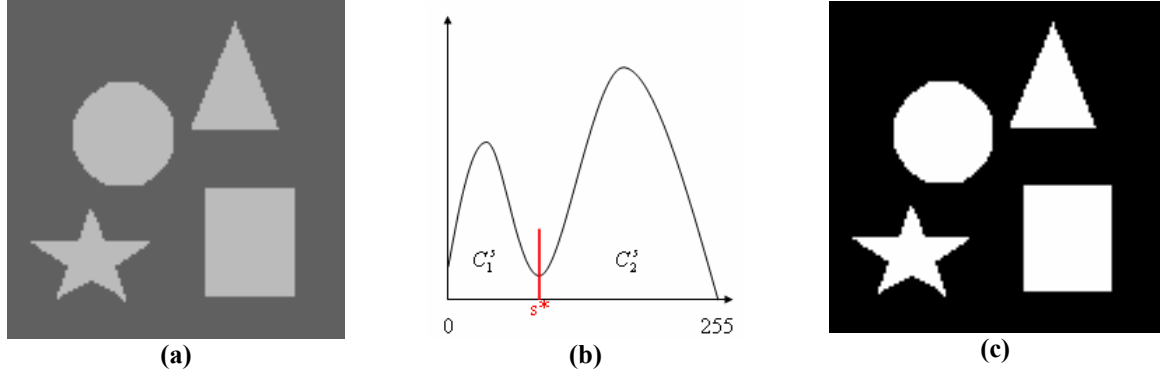


Figure 4-4 : Définition du seuillage, (a) image à niveau de gris, (b) histogramme de l'image à niveau de gris, (c) image seuillée (A noter, 0 correspond aux pixels noirs et 255 au pixels blancs).

Etant donnée une fonction de gris $f(x, y)$ représentant l'image définie sur un domaine $D \subset R^2$, trois types de seuillages binaires peuvent être définis :

- le seuillage par borne inférieure, c'est la transformation de l'image de gris en un ensemble X_s selon l'expression

$$X_s = \{(x, y) \in D / f(x, y) \geq s\} \quad (4.1)$$

- le seuillage par borne supérieure tel que :

$$X^s = \{(x, y) \in D^2 / f(x, y) \leq s\} \quad (4.2)$$

- enfin, le seuillage par bornes inférieures et supérieure tel que :

$$X_{s_1}^{s_2} = \{(x, y) \in D^2 / s_2 \geq f(x, y) \geq s_1\} \quad (4.3)$$

Quel que soit le type de seuillage, on passe d'une fonction à un ensemble et donc pour une image, on passe d'une image à niveaux de gris (sur n bits) à une image binaire (sur 1 bit). Cette notion de seuillage se généralise aisément à plusieurs seuils.

Soit une image composée de N pixels de niveaux de gris i compris entre 0 et $l-1$ ($l=256$ pour une image 8 bits). On peut définir l'histogramme h des niveaux de gris de l'image ou $h(i)$ est le nombre de pixels ayant le niveau de gris i .

Pour un pixel donné, la probabilité d'avoir le niveau de gris i est donc :

$$p(i) = \frac{h(i)}{N} \quad (4.4)$$

C'est en analysant cette densité de probabilité que l'on pourra déterminer automatiquement le seuil.

Supposons que l'image est divisée en deux classes C_1 et C_2 séparées par le seuil s . C_1 , respectivement C_2 , correspond aux pixels de niveaux de gris compris entre 0 et s , respectivement $s+1$ et $l-1$.

$$C_1(f) = \{(x, y) \in D / f(x, y) \leq s\} \quad (4.5)$$

$$C_2(f) = \{(x, y) \in D^2 / f(x, y) > s\} \quad (4.6)$$

Nous pouvons alors définir :

- la probabilité pour un pixel x d'appartenir à C_1 ou C_2 :

$$P(C_1) = \sum_{i=0}^s p(i) \quad (4.7)$$

$$\text{et } P(C_2) = \sum_{i=s+1}^{l-1} p(i) \quad (4.8)$$

- les niveaux de gris moyens de C_1 et C_2

$$M_1 = \frac{\sum_{i=0}^s ip(i)}{P(C_1)} \quad (4.9)$$

$$\text{et } M_2 = \frac{\sum_{i=s+1}^{l-1} ip(i)}{P(C_2)} \quad (4.10)$$

- le niveau de gris moyen de l'image :

$$M = \sum_{i=0}^{l-1} ip(i) \quad (4.11)$$

Bien sur, il est possible de généraliser ces notations à une image à n classes notées C_1 , C_2 , ..., C_n ($n \geq 2$), séparées par les seuils s_1, s_2, \dots, s_{n-1} .

Par la suite N_i désignera le nombre de pixels de la classe C_i ainsi :

$$\sum_{i=1}^n N_i = N \quad (4.12)$$

Des méthodes automatiques de détermination du seuil des images existent, nous allons présenter ici deux méthodes : le seuillage par maximisation de l'entropie et le seuillage par maximisation de la variance interclasse. Ces deux méthodes permettent d'obtenir un seuillage automatique des images sans intervention de l'utilisateur.

Seuillage par maximisation de l'entropie

L'entropie d'une image peut être considérée comme une évaluation de l'information qu'elle contient. Shannon (Shannon et *al.*, 1948) a introduit la notion d'entropie associée à une source qui est modélisée par une variable aléatoire discrète, comme la moyenne de la quantité d'information apportée par les réalisations de cette variable. Cette notion est très utilisée dans le domaine du traitement de l'information.

Une méthode définie par Pun, 1980, et améliorée par Kapur, 1985, consiste à maximiser l'entropie de l'image seuillée, afin de rendre maximaux les contrastes entre classes.

Si l'on considère une image comme l'ensemble des réalisations d'une variable aléatoire, on peut évaluer son entropie à priori H à partir de sa densité de probabilité p_i .

$$H = - \sum_{i=0}^{l-1} p_i \log_2 p_i \quad (4.13)$$

L'entropie de l'image seuillée est définie comme la somme des entropies relatives à chaque classe. Notons $H(s)$ l'entropie de l'image seuillée à partir du seuil s , on a :

$$H(s) = H(C_1) + H(C_2) \quad (4.14)$$

avec :

$$H(C_1) = - \sum_{i=0}^s \frac{h(i)}{N_1} \log_2 \frac{h(i)}{N_1} \quad (4.15)$$

$$H(C_2) = - \sum_{i=s+1}^{l-1} \frac{h(i)}{N_2} \log_2 \frac{h(i)}{N_2} \quad (4.16)$$

Ce qui devient après calculs :

$$H(s) = - \frac{1}{N_1} \sum_{i=0}^s h(i) \log_2 (h(i)) - \frac{1}{N_2} \sum_{i=s+1}^{l-1} h(i) \log_2 (h(i)) + \log_2 (N_1 - N_2) \quad (4.17)$$

Le meilleur seuil est obtenu par maximisation de cette expression tel que :

$$H(s^*) = \underset{s \in [0, \dots, l-1]}{\text{Max}} H(s) \quad (4.18).$$

Seuillage par maximisation de la variance interclasse

L'analyse factorielle discriminante AFD est une méthode statistique très utilisée en classification. Le but de la méthode proposée par Otsu, 1979, comme en analyse en composantes principales, est de réduire le nombre de dimensions des données, en recherchant celles suivant lesquelles les classes se séparent le mieux. C'est un outil classiquement utilisé par les statisticiens pour connaître le degré de séparation de deux ou plusieurs sous populations obtenues à partir d'un même ensemble de témoins.

Pour obtenir la meilleure séparation entre 2 classes C_1 et C_2 , au sens de l'analyse factorielle discriminante, on cherche d'une part à éloigner le plus possible les classes les unes des autres, c'est-à-dire à maximiser la variance interclasse $V(s)$, d'autre part à regrouper au mieux chaque classe autour de son centre, c'est-à-dire à minimiser la variance intraclasse $V_1(s)$.

Exprimons ces variances :

$$V(s) = P(C_1)(M_1 - M)^2 + P(C_2)(M_2 - M)^2 \quad (4.19)$$

$$V_1(s) = \sum_{i=0}^s (i - M_1)^2 p(i) + \sum_{i=s+1}^{l-1} (i - M_2)^2 p(i) \quad (4.20)$$

ainsi que la variance totale de l'image V_T :

$$V_T = \sum_{i=0}^{l-1} (i - M)^2 p(i) \quad (4.21)$$

Les trois variances sont liées par le théorème de Huygens. V_T étant indépendante des seuils s_l, \dots, s_{p-l} , maximiser la variance interclasse et minimiser la variance intraclasse sont deux problèmes équivalents. La variance interclasse est la plus facile à calculer.

On retient le seuil s_0 tel que :

$$V(s^*) = \max_{s \in [0, \dots, 255]} V(s) \quad (4.22)$$

On crée alors l'image binaire associée à s^* .

Obtention du contour à partir des images seuillées

Après la segmentation, nous disposons d'une image à deux classes mais pas encore du contour des objets. Le principe retenu pour obtenir ce contour revient à détecter tous les points du fond dont au moins 1 des 4 voisins appartient à l'objet. Ce principe peut être mis en œuvre à partir d'opérateurs morphologiques qui permettent en plus d'éviter les points de rebroussement. De cette façon, le contour est obtenu par soustraction entre le dilaté de l'objet et l'érodé de ce dilaté (Figure 4-5).

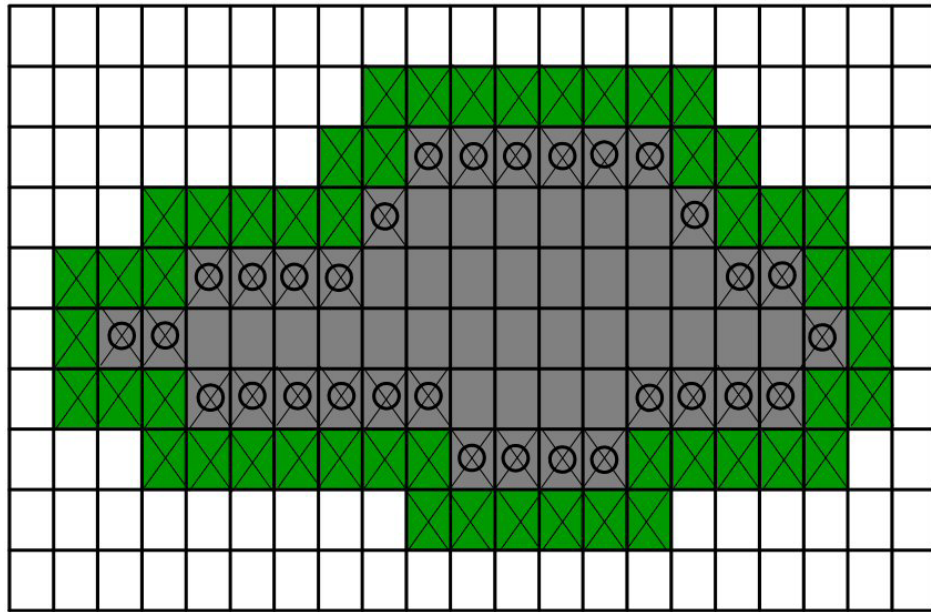


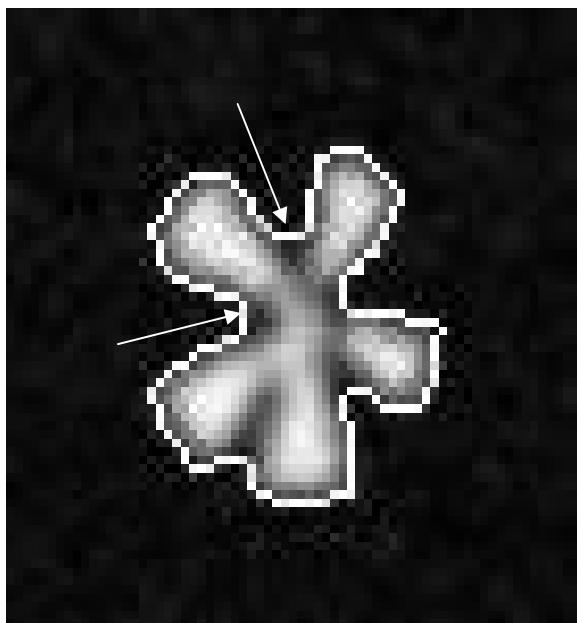
Figure 4-5 : Extraction du contours par morphologie mathématique. En vert dilaté carré de la forme, croix : suppression des point pour obtenir l'érodé croix du dilaté, rond : point appartenant aux contours de la forme.

4.1.2.2. Applications des méthodes de seuillage

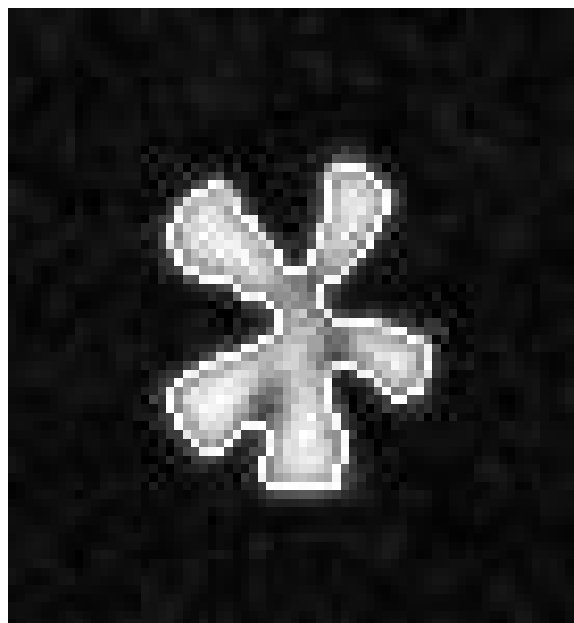
Deux méthodes de seuillage automatique ont été présentées précédemment. Dans cette partie, nous allons étudier l'application de ces méthodes à la segmentation de jets synthétiques puis de jets réels.

Jets synthétiques

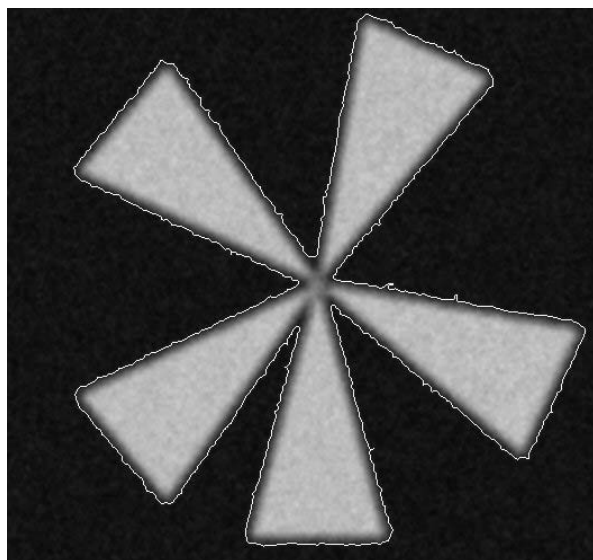
Sur la figure suivante (Figure 4-6), nous avons segmenté les jets synthétiques simulés pour $t = 100 \mu s$ et $t = 1000 \mu s$ après le SOI à partir des deux méthodes de seuillage. Les contours obtenus ont été superposés aux images initiales.



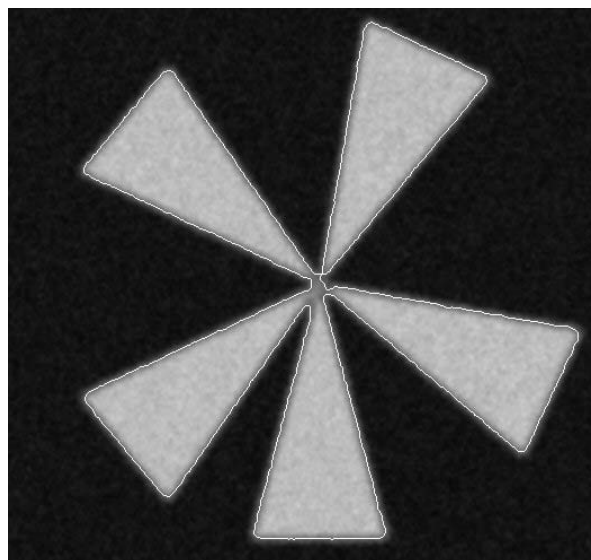
(a)



(b)

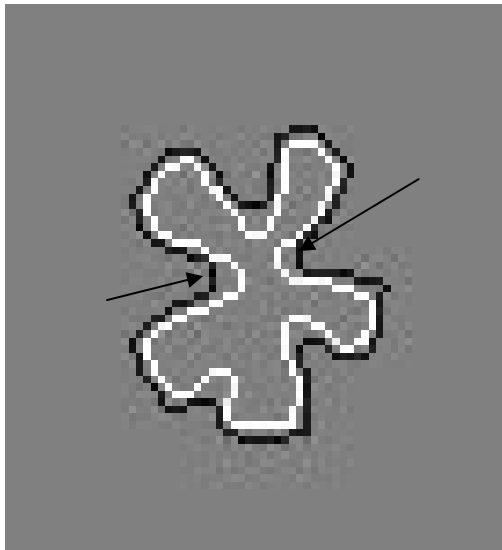


(c)

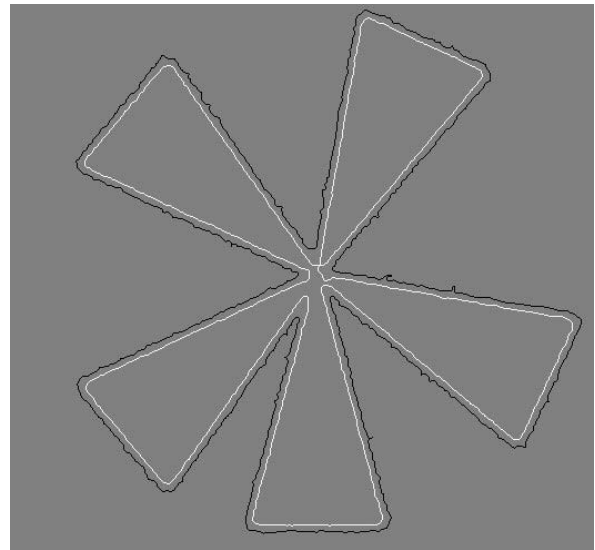


(d)

Figure 4-6 : Détection des contours sur les images synthétique, (a) seuillage par maximisation de l'entropie sur début d'injection synthétique ($t = 100 \mu s$ après SOI), (b) seuillage par maximisation de la variance interclasse sur début d'injection synthétique ($t = 100 \mu s$ après SOI), (c) seuillage par maximisation de l'entropie sur injection développée synthétique ($t = 1000 \mu s$ après SOI), (d) seuillage par maximisation de la variance interclasse sur injection développée synthétique ($t = 1000 \mu s$ après SOI).



(a)



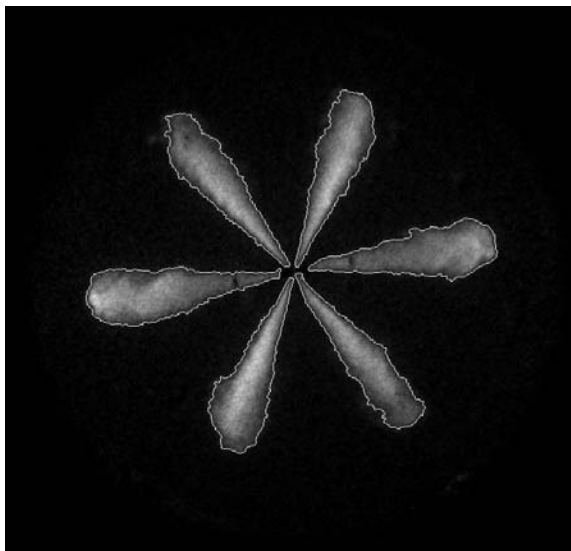
(b)

Figure 4-7 : Comparaison des deux seuillages (noir seuillage par maximisation de l'entropie, blanc seuillage par maximisation de la variance interclasse).

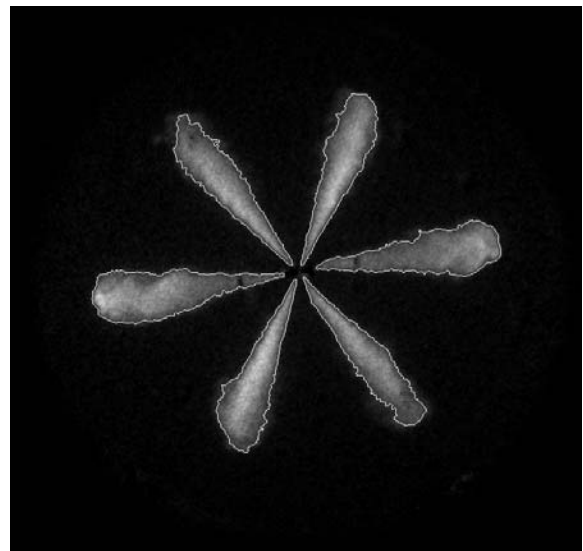
On constate que le seuillage par maximisation de l'entropie donne des contours plus larges que le seuillage par maximisation de la variance interclasse notamment dans la région voisine du nez de l'injecteur Figure 4-7 (a) et Figure 4-7 (b). Le contour le plus proche du modèle triangulaire initial est donc celui obtenu par maximisation de la variance interclasse.

Jets réels

Les deux figures suivantes (Figure 4-8 (a) et (b)) représentent l'application des deux méthodes de seuillage aux jet réels.



(a)



(b)

Figure 4-8 : Détection du contours par seuillage (a) par maximisation de l'entropie, (b) par maximisation de la variance interclasse, sur l'image réelle.

On constate que le contour obtenu par seuillage par maximisation de la variance interclasse semble plus régulier que celui par seuillage maximisation de l'entropie. En effet, la valeur du seuil calculé étant plus élevée, les zones diffuses entourant chaque jet ne sont pas prises en compte. De plus, comme pour les images synthétiques, le contour obtenu par maximisation de la variance interclasse semble plus proche du jet que le contour obtenu par maximisation de l'entropie qui est plus « large ».

4.1.2.3. Détection de contours

Dans les méthodes de contours, on cherche les points où la fonction de gris change rapidement. Ces points peuvent être considérés comme des points de transition de cette fonction de gris. La détection se fait en général à partir d'opérateurs différentiels du premier ou du deuxième ordre.

Si on considère une transition sur un signal monodimensionnel (Figure 4-9), la dérivée première présente un maximum local à la position du point d'inflexion. La détection du maximum permet de détecter ce point. Si on calcule une dérivée seconde, le même point est détecté à partir d'un passage par 0 (Figure 4-9).

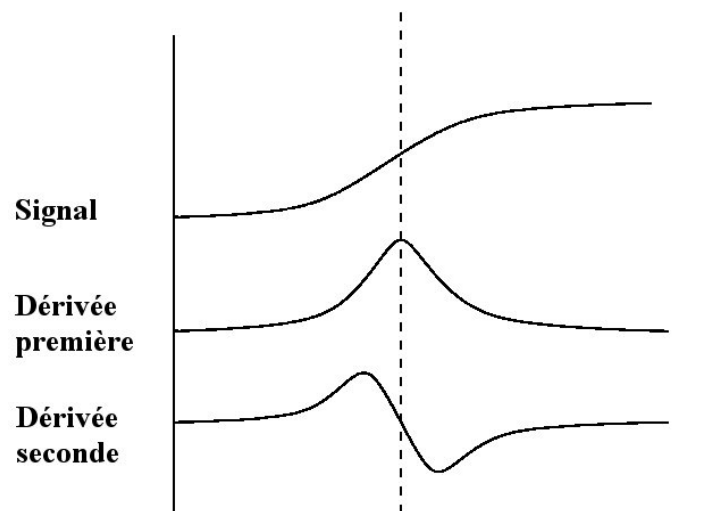


Figure 4-9 : Signal monodimensionnel et ses dérivées première et seconde.

Nous étudions ici deux méthodes utilisant un opérateur du premier ordre. Le plus simple qui a été proposée par Canny, sera présenté en premier. On étudiera ensuite une méthode basée sur la divergence de Jensen Shannon qui a été proposé par Luque Escamilla, 2002.

Détection de Canny

Cette méthode de détection a été proposée par Canny, 1986. Le principe est d'utiliser un opérateur différentiel associé à une fonction de lissage. Le rôle de la fonction de lissage est de rendre l'opérateur moins sensible au bruit. Ainsi, si l'on part d'une fonction de lissage gaussienne d'écart type α , l'opérateur correspondant est de type gradient de gaussienne (GOG) et s'exprime à partir d'un filtre $h_x(x, y)$ et $h_y(x, y)$ définis par :

$$h_x(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left[e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \right] = -\frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.23)$$

$$h_y(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} \left[e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \right] = -\frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.24)$$

A partir de la fonction de gris $f(x, y)$ d'une image, l'opérateur GOG permet d'obtenir une image de gradient dont les deux composantes g_x et g_y sont définies par :

$$g_x = f * h_x \quad (4.25)$$

$$g_y = f * h_y \quad (4.26)$$

Les points de contour sont ensuite détectés comme les maxima locaux du module de l'image gradient sachant qu'un point est un maximum local du gradient si son module est supérieur à celui de ses deux voisins situés sur une droite dans la direction du gradient.

En pratique, on ne retient pas tous les points détectés comme points de contour, mais seulement ceux dont le gradient est supérieur à un seuil ou ceux qui sont connecté à un contour dont l'un des points est supérieur au seuil (seuillage hystérésis).

En résumé, la procédure de détection est réalisée en trois étapes :

- 1) calcul des deux composantes de l'image gradient
- 2) détection des maxima locaux dans la direction du gradient
- 3) seuillage par hystérésis du résultat

Une quatrième étape de prolongement des contours peut être ajoutée pour obtenir des contours plus fermés.

Détection par divergence de Jensen Shannon

Principe

Cette méthode de détection de contours, proposé par Lin, 1991 a montré de bons résultats pour un grand nombre de segmentation (Barranco Lopez et *al.*, 1995 ; Atae Allah et *al.*,

2001). Nous l'avons appliqué à nos images en collaboration avec l'université de Grenade (Espagne) (Luque Escamilla et *al.*, 2002).

Le principe est semblable à celui de Canny sauf que le détecteur de contour utilisé est basé sur le calcul de la divergence de Jensen Shannon (JS).

Si on considère deux classes de pixels C_1 et C_2 ayant des densités de probabilité p_1 et p_2 , la divergence de JS est définie par :

$$JS(p_1, p_2) = \frac{1}{2} [H(p_1 + p_2) - (H(p_1) + H(p_2))] \quad (4.27)$$

Avec $H(p_1) = -\sum p_1(i) \log_2(p_1(i))$ et $H(p_2) = -\sum p_2(i) \log_2(p_2(i))$

Cette divergence augmente lorsque les densités de probabilités sont différentes, c'est-à-dire lorsque les deux classe de pixels ont des propriétés statistiques différentes. Elle est nulle si les deux densités sont identiques.

Les trois étapes sont similaires à celle de la détection de Canny :

- 1) Calcul des images de divergence
- 2) Détection des points de divergence localement maximale
- 3) Fermeture des contours

Nous présentons dans la suite chacune de ces étapes.

Calcul des images de divergence

Considérons une fenêtre formée de deux sous fenêtres et glissant le long d'un contour rectiligne entre des textures différentes (Région a et b) comme le montre la Figure 4-10. Il a été montré (Barranco Lopez et *al.*, 1995), que dans de telles conditions la divergence de JS de l'histogramme normalisé des deux sous fenêtres atteint sa valeur maximale quand chaque sous fenêtre se superpose complètement à une texture différente.

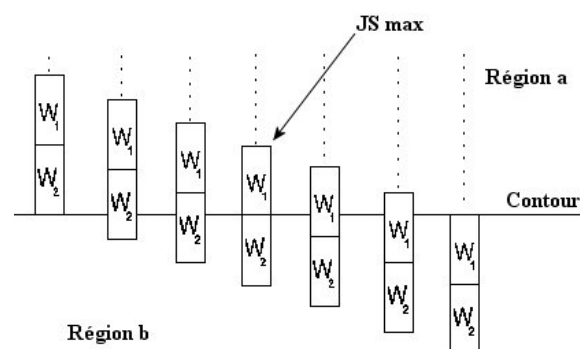


Figure 4-10 : Fenêtre glissant sur un ligne droite séparant deux régions.

Dans l'exemple ci-dessus, les sous fenêtres et le contours sont perpendiculaires, par contre si la fenêtre et le contour ne sont pas perpendiculaires, la divergence de JS a alors une valeur plus petite qui peut être proche de zéro et donc non détectable. Pour éviter cela, il faut tester différentes directions de fenêtres. Pour chaque pixel de l'image, quatre orientations de fenêtre sont techniquement possibles : verticale, horizontale et les deux diagonales, on obtient alors 4 valeurs de JS : $\{JS_1, JS_2, JS_3, JS_4\}$. Seule la valeur maximale de la divergence de JS obtenue en plaçant la fenêtre dans ces quatre directions au pixel d'intérêt est alors gardée. La procédure appliquée pour tous les pixels de l'image permet de construire une image de nombres réels appelée image de divergence. Les pixels de grandes valeurs de divergence deviennent alors candidats pour le contour de l'objet.

En pratique, le calcul de la divergence utilise une information supplémentaire à l'histogramme.

$$JS^* = JS (1 - \alpha + \alpha W) \quad (4.28),$$

où $W = \frac{|N_{w1} - N_{w2}|}{N_w}$, N_{w1} et N_{w2} étant la moyenne des niveaux de gris des sous fenêtre W_1 et

W_2 , et N_w le maximum du niveau de gris dans la fenêtre (facteur de normalisation).

$\alpha \in [0, 1]$ est un facteur d'atténuation qui détermine le poids de la divergence de JS et les niveaux de gris à l'intérieur de la fenêtre. Cette modification permet à la divergence de JS d'être plus robuste pour différents types d'image. Elle transforme l'algorithme en un algorithme hybride entre un algorithme basé sur les textures (Park et *al.*, 1994), la divergence de JS (Gómez Lopera et *al.*, 2000) et un algorithme basé sur les niveau de gris (gradient, Laplacien, etc (Pratt, 1994)).

Détection des points de divergence localement maximale

Comme pour la méthode de Canny, les points du contour sont détectés comme des maxima locaux dans la direction perpendiculaire au contour. Il faut donc d'abord estimer la direction du contour. Cette estimation peut être faite lors du calcul de JS dans les quatre directions. En effet, si on considère que la valeur de la divergence de JS est une fonction π -périodique de l'orientation de la fenêtre sur l'image. Elle atteint sa valeur maximale pour une orientation β et sa valeur minimale pour $\beta + \pi$. Un modèle théorique décrivant cette fonction peut alors être écrit sous la forme :

$$JS(x) = a + b \cos(\beta + 2\pi x) \text{ avec } x \in [0, 1] \quad (4.29)$$

On peut alors montrer que la direction δ du contour peut être obtenue par $\delta = \pi x$ avec :

$$\begin{aligned}
\text{si } JS_1 - JS_3 \geq 0, JS_2 - JS_4 \geq 0 &\Rightarrow x = \frac{JS_2 - JS_4}{4[(JS_1 - JS_3) - (JS_2 - JS_4)]} \in [0, 1/4] \\
\text{si } JS_1 - JS_3 \geq 0, JS_2 - JS_4 \leq 0 &\Rightarrow x = \frac{4(JS_1 - JS_3) - 3(JS_2 - JS_4)}{4[(JS_1 - JS_3) - (JS_2 - JS_4)]} \in [3/4, 1] \\
\text{si } JS_1 - JS_3 \leq 0, JS_2 - JS_4 \geq 0 &\Rightarrow x = \frac{2(JS_1 - JS_3) - (JS_2 - JS_4)}{4[(JS_1 - JS_3) - (JS_2 - JS_4)]} \in [1/4, 1/2] \\
\text{si } JS_1 - JS_3 \leq 0, JS_2 - JS_4 \leq 0 &\Rightarrow x = \frac{2(JS_1 - JS_3) + 3(JS_2 - JS_4)}{4[(JS_1 - JS_3) - (JS_2 - JS_4)]} \in [1/2, 3/4]
\end{aligned} \tag{4.30}$$

L'erreur sur la détermination de x n'est jamais plus grande que 0.004.

Ainsi un point est détecté comme maximum local si sa divergence est supérieure à celle de ses deux voisins v_1 et v_2 situés sur une droite perpendiculaire à la direction du contour, c'est-à-dire que pour chaque voisin v_k ($k = 1, 2$), la divergence $JS(v_k)$ doit vérifier :

$$JS_{centrale} - JS(v_k) \geq T_d \tag{4.31}$$

où T_d est un seuil.

Les pixels marqués sont alors les maxima locaux de l'image de divergence. Il est à noter que la détection dépend de la valeur de T_d qui peut être modifiée par l'utilisateur si nécessaire.

Cette méthode de détection des pixels locaux du contour nécessite quelques prétraitements de l'image de divergence. Des petites fluctuations, souvent dues au bruit sur l'image originale, ou sur la régularité de la texture, peuvent introduire un grand nombre de faux maximaux. L'image de divergence est lissée à l'aide d'un filtre moyenneur 3×3 .

Fermeture des contours

Pour obtenir des contours fermés, une troisième étape a été ajoutée. Son principe consiste à prolonger les points situés aux extrémités des contours par des points dont la divergence n'est pas localement maximale.

Les critères retenus pour rattacher 1 pixel à l'extrémité d'un contour sont :

- 1) Sa divergence de JS doit être relativement élevée. La première condition est alors :

$$JS_{fin} - JS_{voisin-candidat} \leq \tau_d \tag{4.32}$$

où τ_d est un seuil, n'as pas de relation avec le seuil T_d de l'étape 2 de la procédure.

- 2) La direction du contour estimée du pixel de fin (Dir_{fin}), la direction du contour du candidat voisin ($Dir_{candidat-voisin}$) et la direction de la ligne physique les joignant

$(Dir_{fin, candidat-voisin})$ ne doivent pas différer de plus d'une certaine quantité. La seconde condition est alors :

$$\left(Dir_{fin, candidat-voisin} - Dir_{fin}\right)^2 + \left(Dir_{fin, candidat-voisin} - Dir_{candidat-voisin}\right)^2 \leq \tau_{\theta} \quad (4.33),$$

où τ_{θ} est un autre seuil.

4.1.2.4. Application à la détection de contours

Détecteur de Canny

La Figure 4-11 présente les résultats obtenus sur les images synthétiques pour $t = 100 \mu s$ et $t = 1000 \mu s$ après SOI et $\sigma = 3$. Le choix de la valeur de σ résulte d'un compromis entre bonne localisation et sensibilité au bruit. La valeur $\sigma = 3$ est la valeur minimale permettant une bonne détection pour des jets bien développés. On constate que cette valeur ne permet pas une très bonne localisation des jets au début de l'injection. En effet, sur la Figure 4-11 (a) les jets ne sont pas bien séparés.

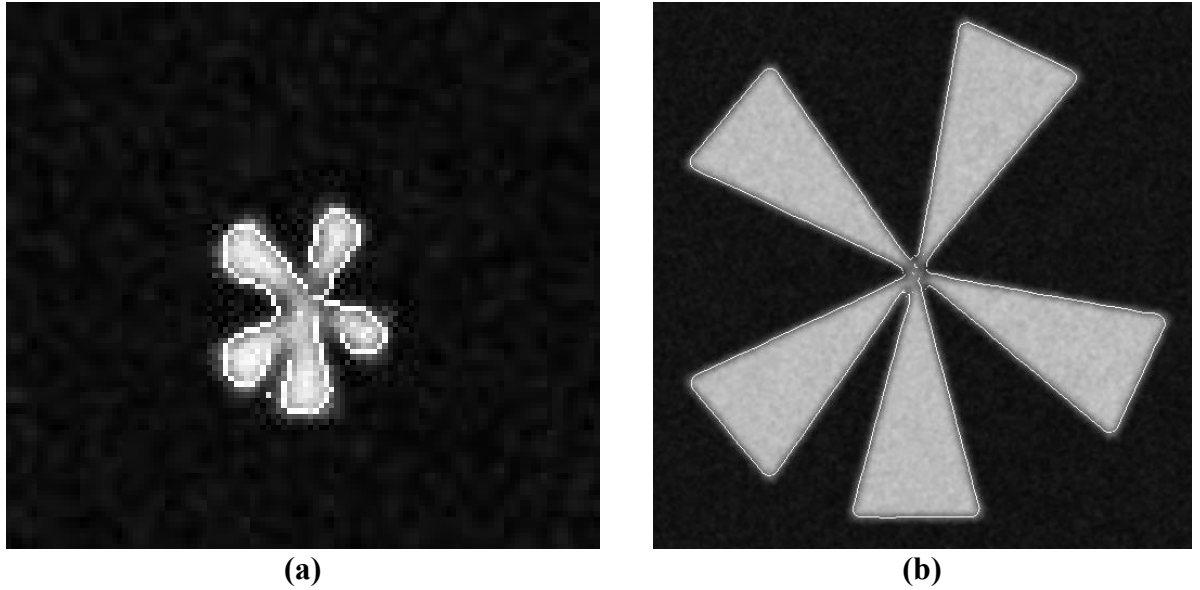
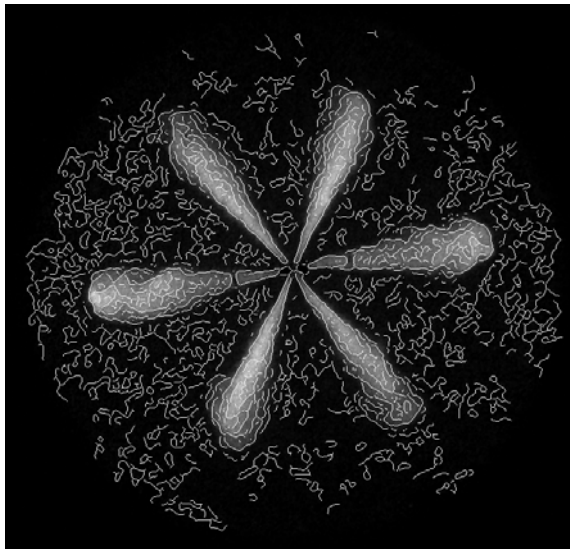
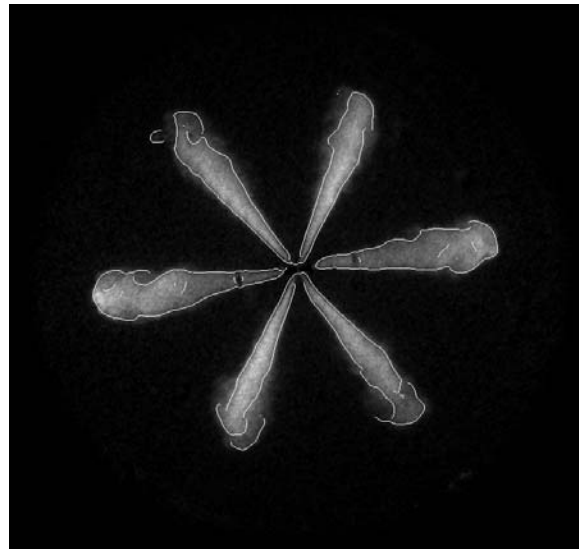


Figure 4-11 : Détection de contours par la méthode de Canny sur les images synthétiques (a) $\sigma = 2$, (b) $\sigma = 3$.



(a)



(b)

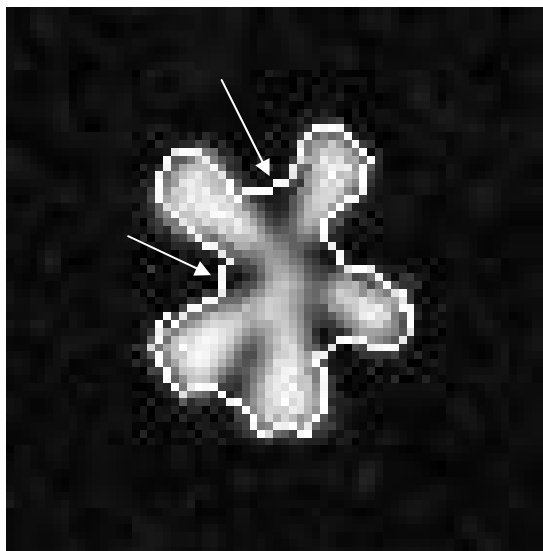
Figure 4-12 : Détection de contours par la méthode de Canny sur l'image réelle (a) $\sigma = 1$, (b) $\sigma = 4$.

Sur la Figure 4-12 on peut observer l'influence de σ sur la détection des contours. Pour de petite valeur de σ Figure 4-12 (a) la position des contours est précise mais d'une part ils sont fragmentés et d'autre part des contours appartenant au fond sont détectés. Pour de grandes valeurs de σ (Figure 4-12 (b)), les contours sont plus réguliers et appartiennent tous aux jets ou aux zones diffuses situées à proximité. Cependant, les contours demeurent fragmentés (en particulier dans les zones diffuses) et ils ne sont pas bien localisés dans la zone située proche de l'injecteur.

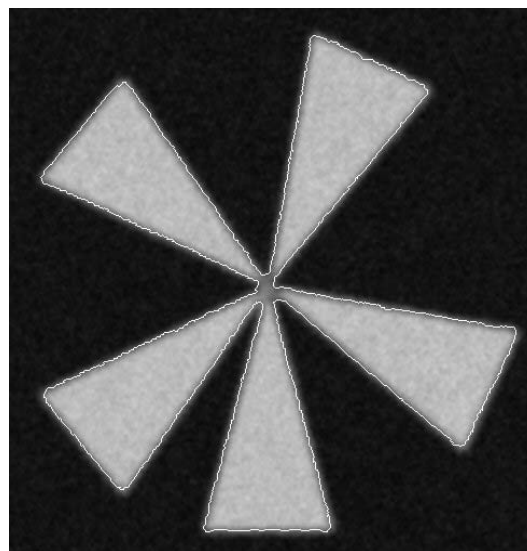
Jensen Shannon

La méthode de Jensen Shannon nécessite une adaptation des paramètres en fonction des images. Dans notre étude, nous avons décidé de ne pas faire varier ces paramètres de façon à disposer d'un algorithme qui ne fasse pas appel à l'intervention de l'utilisateur au cours du traitement des images.

La Figure 4-13 présente les résultats obtenus pour un jeu de paramètres optimal.



(a)

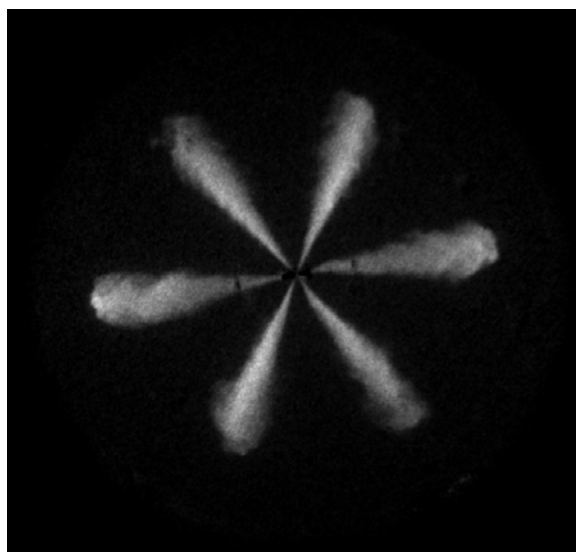


(b)

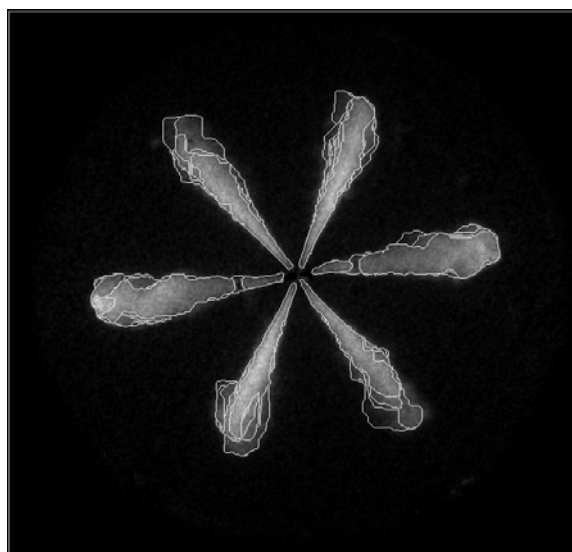
Figure 4-13 : Détection de contours par la méthode de Jensen Shannon sur l'image synthétique.

On constate que ce jeu de paramètres est idéal pour les images de relative grande taille (Figure 4-13 (b)) alors que pour les images plus petites (Figure 4-13 (a)) la détection ne se fait pas correctement (mauvaise séparation) contrairement à d'autres méthodes telles que le seuillage par maximisation de la variance interclasse.

La Figure 4-14 présente les résultats obtenus avec les mêmes paramètres sur l'image réelle.



(a)



(b)

Figure 4-14 : Détection de contours par la méthode de Jensen Shannon sur l'image réelle.

On peut s'apercevoir sur l'image résultat Figure 4-14 (b) que en plus des contours du jet, on obtient une information complémentaire concernant les zones internes du jet. Il est possible de définir différentes zones ou régions avec des niveaux de gris différents. Ceci pourrait être intéressant pour définir une notion de richesse locale du jet. Pour notre étude de pénétration, d'angle et de volume, nous avons considéré la frontière extérieure.

4.1.3. La méthode développée

Dans une première partie, nous allons justifier le choix de notre méthode, puis nous verrons l'adaptation complète à la mesure des paramètres morphologique des jets.

4.1.3.1. Choix de la méthode

Une comparaison a été menée à partir des contours obtenus sur les images synthétiques de jets à différentes tailles à partir des paramètres optimaux déterminés dans le paragraphe précédent. La pénétration, l'angle et le volume sont mesurés et comparés à leur mesure réelle. Les pourcentages d'erreur donnés entre parenthèse sont exprimés en valeur moyenne.

	<i>Intervention utilisateur</i>	<i>Temps de calcul</i>	<i>Pénétration</i>	<i>Angle</i>	<i>Volume</i>
<i>Seuillage par maximisation de l'entropie</i>	0 paramètre	<1s	t=1000 μ s : bon (3.3%) t=300 μ s : moyen (5.2%) t=100 μ s : moyen (4.6%)	t=1000 μ s : bon (1.7%) t=300 μ s : mauvais (29%) t=100 μ s : mauvais (30%)	mauvais sur l'ensemble (<40%)
<i>Seuillage par maximisation de la variance interclasse</i>	0 paramètre	<1se	bon sur l'ensemble (<2.7%)	moyen sur l'ensemble (<10%)	moyen sur l'ensemble (<10%)
<i>Canny</i>	2 ou 3 paramètres	<2s	t=1000 μ s : bon (1.5%) t=300 μ s : bon (2.7%) t=100 μ s : moyen (6.7%)	moyen sur l'ensemble (<9%)	moyen sur l'ensemble (<10%)
<i>JS</i>	2 ou 3 paramètres	<3s	bon sur l'ensemble (<3%)	moyen sur l'ensemble (<10%)	t=1000 μ s : bon (3.22%) moyen sur le reste (<10%)

Tableau 4-1 : Comparaison des différentes méthodes de traitement d'images.

Sur les images de synthèse dont les propriétés sont connues, on constate que la méthode de JS, donne d'assez bons résultats concernant la pénétration, l'angle et le volume comparé aux autres méthodes. Par contre, elle nécessite l'intervention de l'utilisateur pour le choix de certains paramètres.

La méthode de Canny donne de bons résultats concernant la pénétration sur les grands jets et les volumes, la détermination de l'angle est moins bonne. Par contre, le fait que les contours ne soient pas fermés pose des problèmes pour le volume.

La méthode utilisant le seuillage par maximisation de l'entropie ne donne pas bonne satisfaction notamment concernant la mesure du volume (très surestimé, erreur d'environ 50%).

La méthode de seuillage par maximisation de la variance interclasse ne nécessite aucune intervention de l'utilisateur et les résultats sont assez bon comparé à JS et Canny. Elle est peut sensible au bruit et ne nécessite aucune intervention de l'utilisateur.

On constate d'une manière générale que l'erreur sur l'angle est relativement importante. En effet la détermination de cet angle est fortement conditionnée par la position du nez de l'injecteur. De plus on peut s'apercevoir que les méthodes de détection de contours ne donne pas un départ de jets net.

Compte tenu de l'ensemble de ces résultats, c'est la méthode de seuillage par maximisation de la variance interclasse que nous avons retenue. La précision de mesure ($<10\%$) qu'elle permet d'obtenir sur l'ensemble des paramètres est compatible avec les spécifications du système de mesures à réaliser. Sa rapidité, sa simplicité et l'absence de paramètres sont également des atouts majeurs comparés aux autres méthodes.

4.1.3.2. Adaptation à la segmentation des jets

La mesure automatique des paramètres (pénétration, angle volume) est réalisée à partir des étapes suivantes : détection du nez, labellisation de chaque jet, mesures, corrections des mesures. Pour une série de séquence d'images donnée correspondant à une série d'acquisition de jets, les deux premières étapes de détection du nez et de labellisation des jets sont faites une seule fois avant de commencer les mesures. Ensuite les deux étapes de mesure et de correction sont faites successivement pour chaque image.

Détection automatique du nez de l'injecteur

La position du nez de l'injecteur intervient dans la mesure de la pénétration et de l'angle, comme nous l'avons défini au chapitre 1. Sa détection automatique se fait à partir de deux images : la première sans présence de jet (seul le nez de l'injecteur est présent), la deuxième avec présence de jet. Sur la deuxième image, on mesure le barycentre de l'ensemble des jets. Ce point nous renseigne sur une zone d'intérêt dans laquelle se trouve le nez de l'injecteur. Le nez étant très lumineux, nous utilisons une seuillage par maximisation de la variance interclasse qui permet de repérer les deux zones les plus intenses. Le nez est positionné au milieu de ces 2 zones.

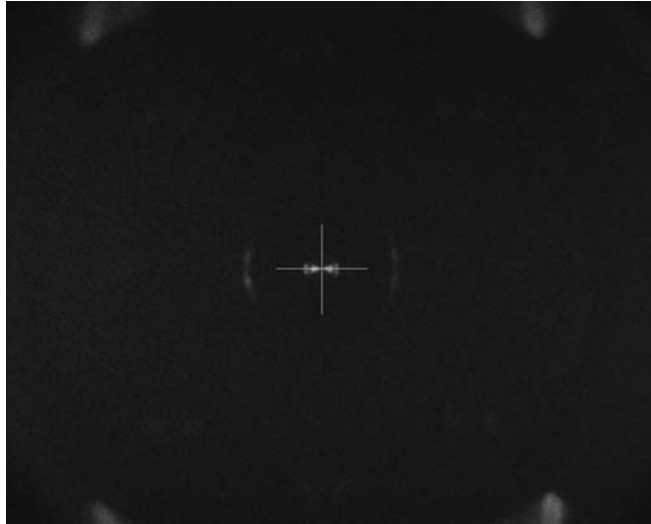


Figure 4-15 : Détection automatique du nez.

Labellisation

Une étape de labellisation a été mise en place afin de pouvoir repérer les jets et savoir sur quel jet les mesures ont été réalisées.

Cette étape est obtenue à partir de la position du nez et en utilisant une image avec des jets bien formée. Cette image est obtenue pour un délai égal à la durée d'injection. Un cercle (Figure 4-16) est disposé sur cette image et nous repérons les intersections entre les jets et ce cercle. La limite entre deux jets est la médiatrice entre deux points d'intersections consécutifs appartenant à deux jets différents.

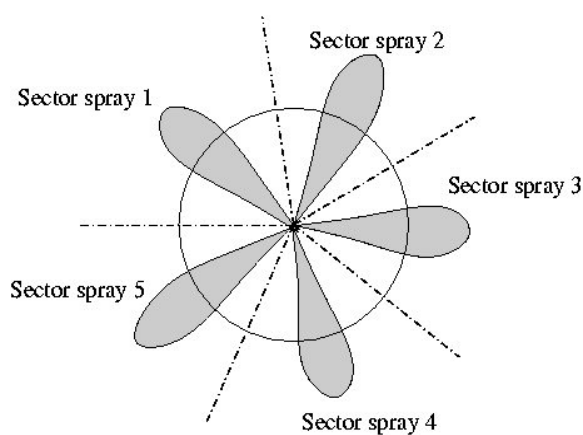


Figure 4-16 : Schéma de labellisation.

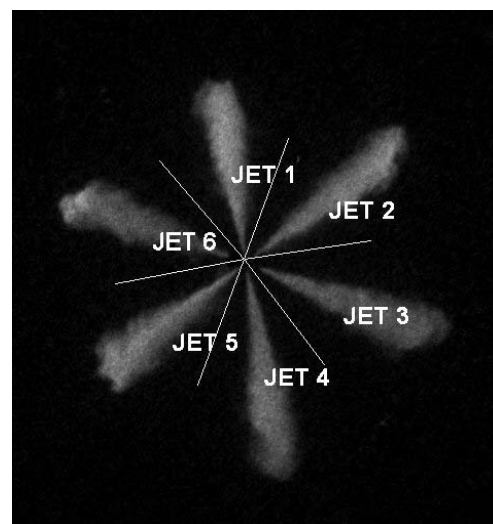


Figure 4-17 : Labellisation des jets.

Mesure automatique des paramètres sur les images

Désormais nous connaissons la position du nez de l'injecteur et le secteur d'étude de chaque jet. Les séquences d'images peuvent maintenant être traitées pour la mesure des paramètres.

Chaque image de chaque séquence est traitée en quatre étapes qui sont présentées sur la Figure 4-18 et que nous allons maintenant détailler :

- **Prétraitement** : pour améliorer l'image qui est altérée par un bruit produit notamment par l'intensificateur de la caméra, nous appliquons un filtrage médian 5×5 .
- **Seuillage** : l'image est binarisée à partir de la technique de maximisation de la variance interclasse (paragraphe 4.1.2.1). Chaque jet est binarisé séparément des autres à partir des secteurs qui ont été déterminés dans l'étape de labellisation.
- **Détection des contours** : pour pouvoir faire les mesures efficacement, seul le contour des jets segmentés est conservé.
- **Mesures** : les trois paramètres : pénétration, angle et volume sont mesurés pour chaque jet à partir de son contour. Le principe de mesure de chacun des paramètres ne sera pas décrit dans son détail (Annexe interne EFS).

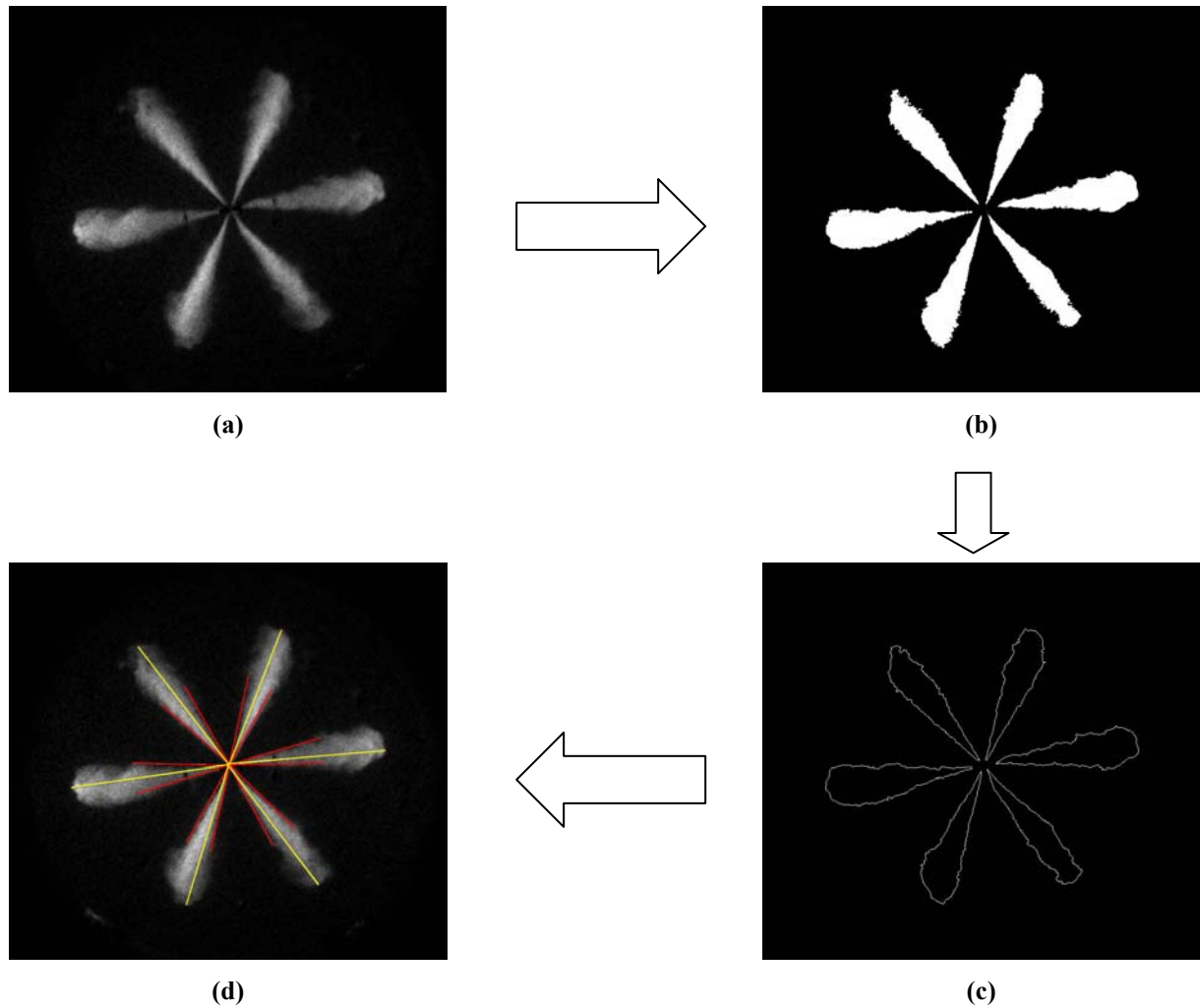


Figure 4-18 : Exemple de traitement complet, (a) image de base, (b) seuillage par maximisation de la variance interclasse, (c) détection de contour par morphologie mathématique, (d) mesure des paramètres (pénétration et angle).

Correction des mesures

L'image que nous avons acquise est en réalité une projection des jets dans le plan image (Figure 4-19 :). En effet, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 1 et comme nous pouvons le voir sur la Figure 4-20 qui représente une coupe du nez de chaque injecteur utilisé, les jets ne sont pas horizontaux, mais présentent un angle avec la verticale. De ce fait, ces jets ne sont pas dans le plan image. Par conséquent, les mesures doivent être corrigées.

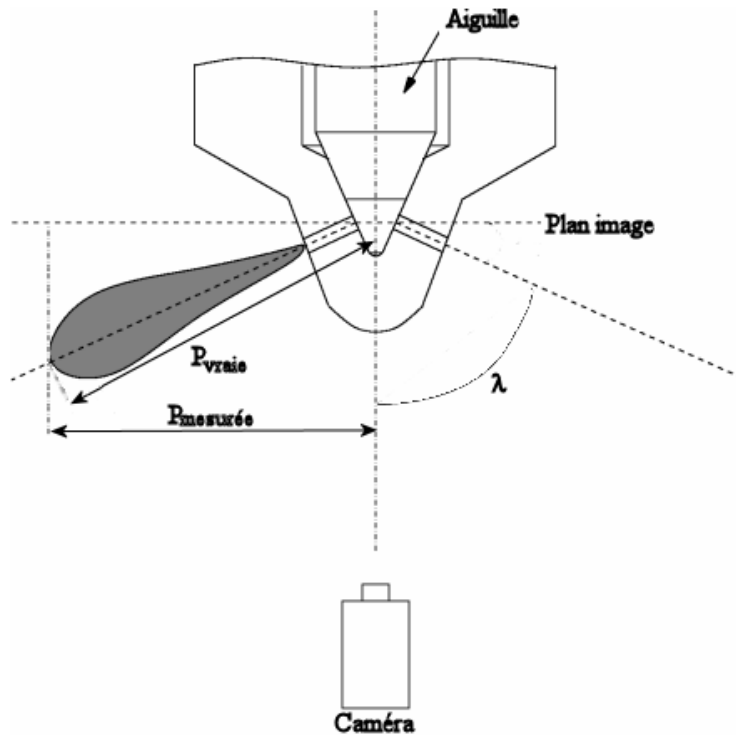


Figure 4-19 : Pénétration et angle de projection.

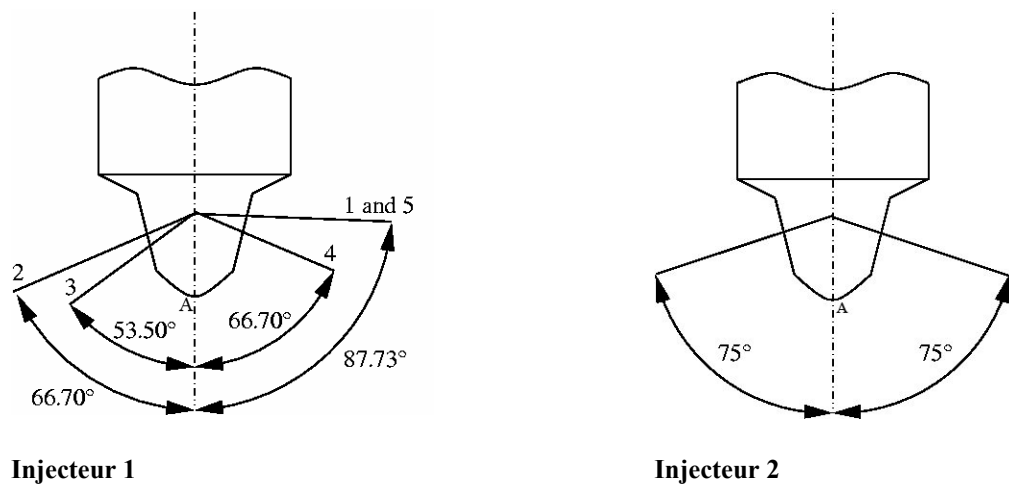


Figure 4-20 : Position des trous sur les injecteurs utilisé : (a) injecteur 1, (b) injecteur 2.

Correction de la pénétration

La pénétration $P_{mesurée}$ est la projection selon l'angle λ de P_{vraie} dans le plan image (Figure 4-19 :).

$$P_{vraie} = \frac{P_{mesurée}}{\sin(\lambda)} \quad (4.34)$$

Correction de l'angle d'ouverture

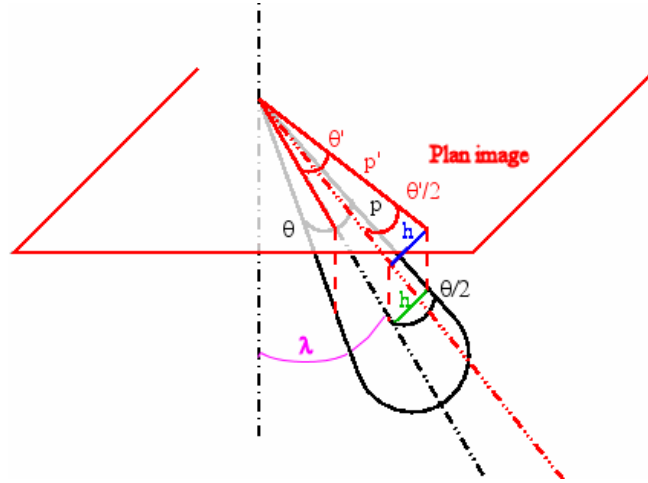


Figure 4-21 : Projection de l'angle du jet.

L'angle d'ouverture du jet en noir (Figure 4-21) est projeté en un angle en rouge dans le plan image. Le demi angle du jet $\theta/2$ est projeté en $\theta'/2$, la longueur p devient p' . On obtient les équations suivantes :

$$\sin\left(\frac{\theta'}{2}\right) = \frac{h}{p'} \quad (4.35)$$

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{h}{p} \quad (4.36)$$

$$\text{et } \cos\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) = \sin(\alpha) = \frac{p'}{p} \quad (4.37)$$

Utilisant ces équations ((4.35), (4.36), (4.37)), on peut calculer l'angle réel du jet:

$$\theta = 2 \arcsin\left(\sin(\lambda) \sin\left(\frac{\theta'}{2}\right)\right) \quad (4.38)$$

Correction du volume

Le diamètre de chaque disque est conservé par projection, par contre ce qui est modifié est la hauteur de ces disques, par conséquent :

$$h_{\text{vraie}} = \frac{h_{\text{mesurée}}}{\sin(\lambda)} \quad (4.39)$$

et donc :

$$V = \sum \pi \left(\frac{D_{\text{mesuré}}}{2} \right)^2 \frac{h_{\text{mesuré}}}{\sin(\lambda)}$$

Vérification de la correction de la pénétration et de l'angle

Dispositif expérimental

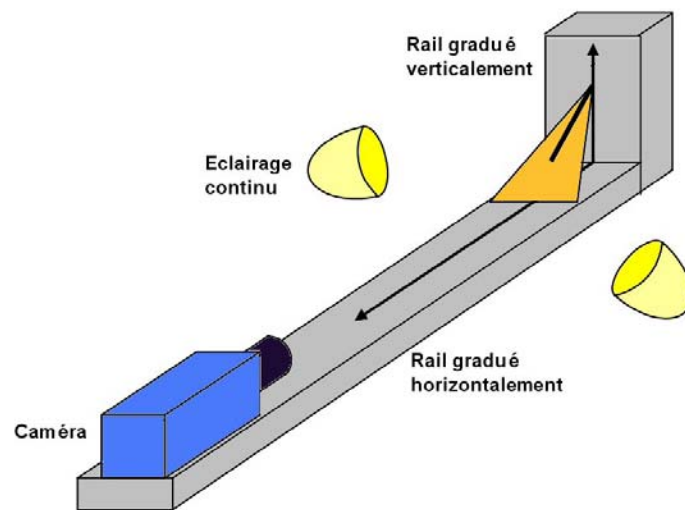


Figure 4-22 : Banc de mesure pour la vérification de la correction de l'angle.

Pour vérifier la correction de la pénétration et de l'angle, nous avons réalisé 2 patrons de jets avec des angles d'ouverture différents (20° et 40°) et dessiné dessus une droite de 4 cm.

Le modèle est placé sur un banc de mesure (Figure 4-22).

Paramètres :

Angle d'ouverture	Inclinaison position 1	Inclinaison position 2
20°	20°	40°
40°	20°	40°

Tableau 4-2 : Positionnement des angles.

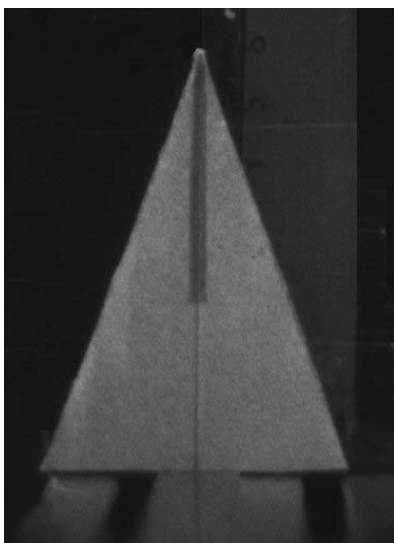


Figure 4-23 : Angle 40° avec une inclinaison de 20° par rapport à l'axe de l'injecteur.

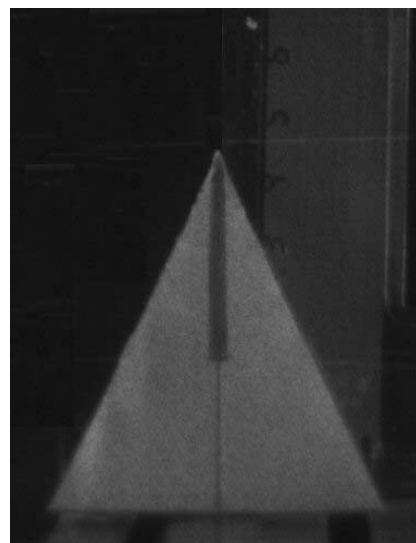


Figure 4-24 : Angle 40° avec une inclinaison de 40° par rapport à l'axe de l'injecteur.

On peut déjà constater sur ces deux images (Figure 4-23 et Figure 4-24) la différence entre les deux angles due à la projection de celui-ci sur le plan image.

Correction de la pénétration

Pour la correction de la pénétration, on mesure la longueur du trait en pixel, que l'on convertit en μm . Pour la correction, on utilise la formule (4.34)

Résultat de la correction de la pénétration :

Angle d'ouverture	20°			40°		
Inclinaison	0°	20°	40°	0°	20°	40°
Pénétration mesurée	4.03	3.84	3.19	3.99	3.81	3.21
Pénétration corrigée	/	4.09	4.16	/	4.05	4.18
Erreur	0.7%	2.2%	4%	0.2%	1.2%	4.5%

Tableau 4-3 : Résultats de la correction de la pénétration.

On constate que la correction de la pénétration est bonne pour l'inclinaison de 20° par contre pour l'inclinaison de 40°, l'erreur est relativement grande.

Correction de l'angle d'ouverture

L'angle est mesuré par notre méthode et pour la correction, on utilise l'équation (4.38).

Résultat de la correction de l'angle :

Angle d'ouverture	20°			40°		
Inclinaison	0°	20°	40°	0°	20°	40°
Angle mesuré	19.65	20.84	25.48	40.26	42.58	51.25
Angle corrigé	/	19.57	19.45	/	39.9	38.69
Erreur	1.7%	2,1%	2.7%	0.6%	0.2%	4.8%

Tableau 4-4 : Résultats de la correction de l'angle.

On constate que la correction de l'angle d'ouverture est très bonne sauf pour l'angle de 40° avec une inclinaison de 40°. Pour l'angle d'ouverture de 20°, l'erreur est de l'ordre de 2%, pour l'angle d'ouverture de 40°, l'erreur est très faible pour l'inclinaison nulle et de 20°.

De cette étude, il est possible de conclure que la correction est bonne pour les inclinaisons de l'ordre de 20°, par contre, l'erreur est assez grande pour une inclinaison plus grande de l'ordre de 40°, notamment pour la pénétration. Pour les injecteur classique, l'inclinaison n'est pas très fort par contre une étude devra être menée pour les injecteurs HCCI qui ont une inclinaison de jet relativement grande.

Sensibilité au niveau de seuil

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence du niveau de seuil sur la mesure des paramètres morphologiques (angle, pénétration, volume). Les mesures sont faites sur deux images moyennes (il s'agit de la moyenne de 40 images prises au même instant) pour deux pressions d'injection différentes et pour la même contre pression. La mesure des paramètres est obtenue à partir des définitions exposées au chapitre 1.

Pour étudier la sensibilité au niveau de seuil, nous avons seuillé l'image avec un seuil variable de 16 à 70 et regardé l'évolution des paramètres : pénétration (Figure 4-25), angle (Figure 4-26) et volume (Figure 4-27).

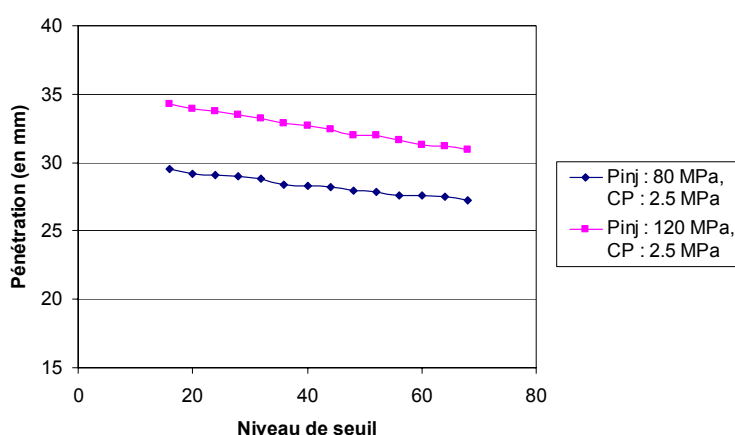


Figure 4-25 : Mesure de la pénétration du spray en fonction du niveau de seuil.

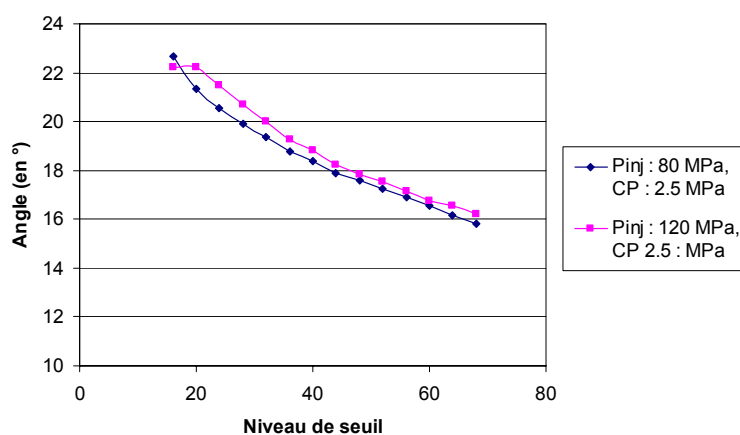


Figure 4-26 : Mesure de l'angle du spray en fonction du niveau de seuil.

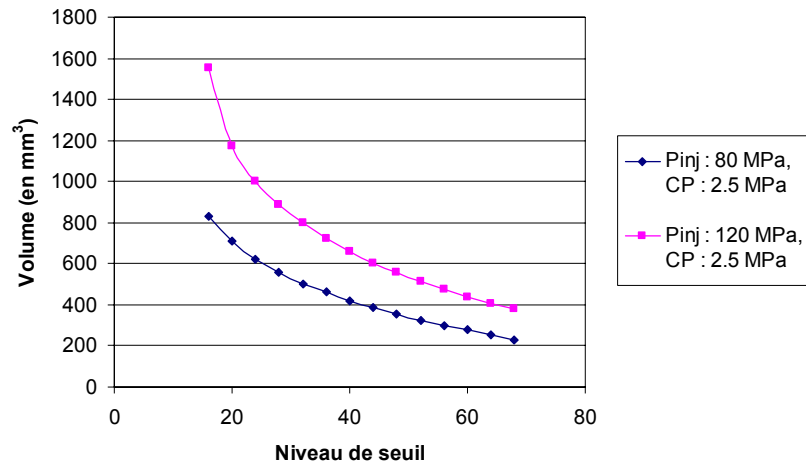


Figure 4-27 : Mesure du volume du spray en fonction du niveau de seuil.

On s'aperçoit que l'angle et le volume sont très sensibles à la variation du seuil. Par contre la pénétration l'est beaucoup moins. Cette étude confirme la nécessité d'utiliser un seuil adapté à chaque image. Elle souligne également l'inconvénient des méthodes par seuillage qui ne sont pas très précises pour le positionnement du contour du jet.

Synoptique complet de l'algorithme

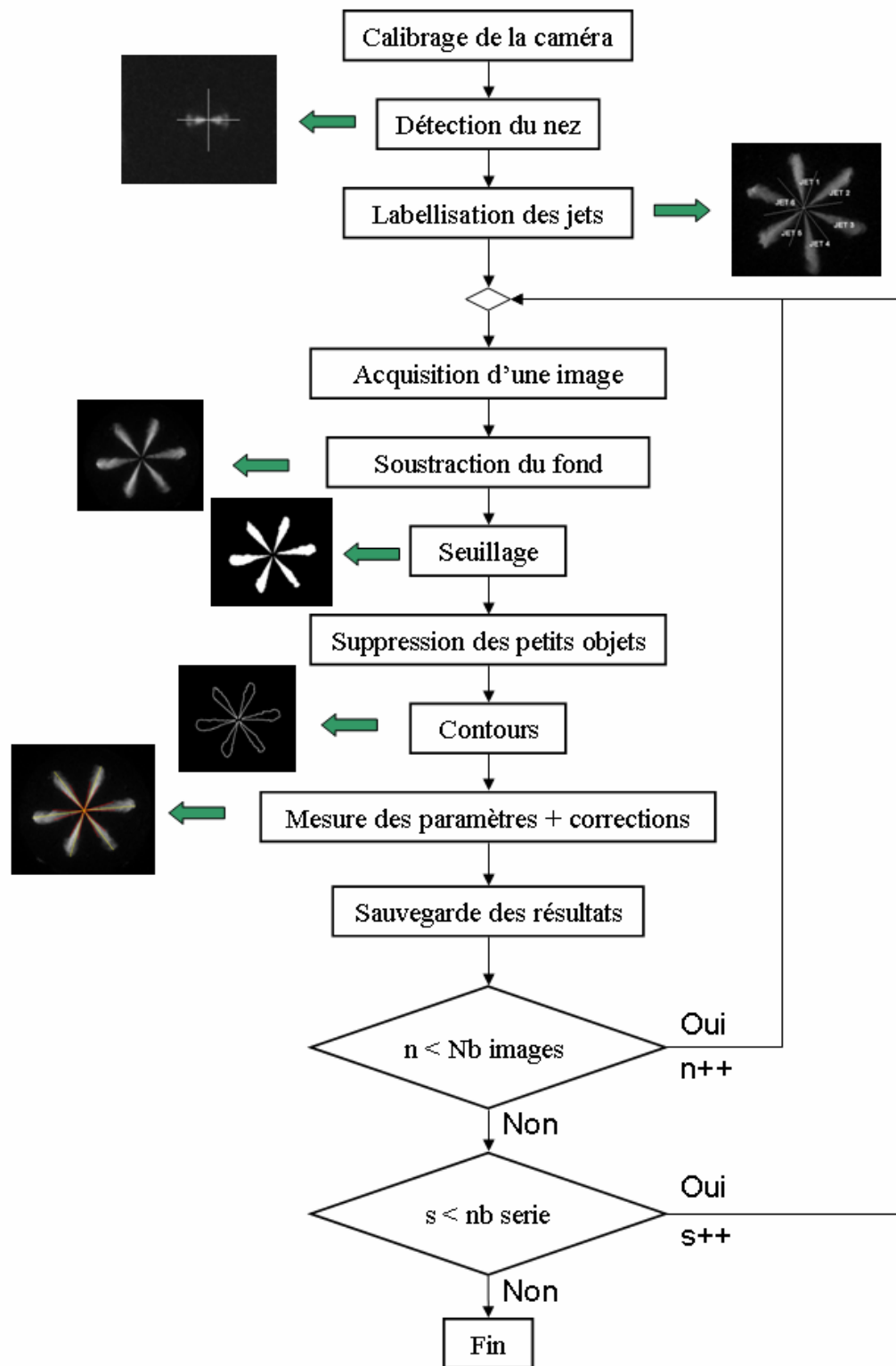


Figure 4-28 : Organigramme du traitement d'image appliqué.

4.2. L'holographie numérique

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au positionnement des particules situées en bord de jet. Nous avons pour cela réalisé une première série de mesures dont les résultats seront présentés au chapitre 5. Nous nous sommes essentiellement intéressés au positionnement des particules, l'étude granulométrique n'a pas été menée mais des expérimentations sont en cours pour utiliser l'information de l'hologramme et estimer une granulométrie globale dans le volume d'étude (Denis et *al.*, 2004). Ce travail a permis de réunir autour d'une même expérimentation les travaux de thèse de C. Fournier, 2003 et de C. Barat, 2004.

Dans une première partie, nous allons présenter le principe de l'holographie numérique, l'holographie optique étant décrite dans l'annexe 10. Puis ensuite, nous verrons comment détecter les particules dans le volume d'étude et présenterons des résultats sur des hologrammes simulés.

4.2.1. Principe de l'holographie numérique

Le montage holographique utilisé est un montage en ligne. Il consiste à illuminer le volume d'étude avec un faisceau laser collimaté. Les interférences entre ce faisceau (onde plane de référence) et l'onde diffractée par les particules, sont enregistrées par une caméra numérique placée perpendiculairement au faisceau laser. (Figure A10- 3, Figure 3-11).

Dans le cas d'une particule positionnée transversalement en (x_0, y_0) et à une distance z_0 du capteur, l'intensité enregistrée à un instant donné au point (x, y) du capteur est proportionnelle à (Burraga-Lefebvre et *al.*, 2000) :

$$H_N(x, y) = \left[1 - 2\mathcal{G} * \delta_{x_0, y_0} * \Re(h_{z_0}) \right](x, y) \quad (4.40)$$

où $*$ représente le produit de convolution, $\mathcal{G}(x, y)$ est la fonction d'ouverture binaire de la particule (typiquement un cercle), δ_{x_0, y_0} représente la distribution de Dirac en (x_0, y_0) et $\underline{h_{z_0}}(x, y)$ la fonction de Fresnel :

$$\underline{h_{z_0}}(x, y) = \frac{1}{j\lambda_o z_0} e^{j\pi(x^2 + y^2)/\lambda_o z_0} \quad (4.41)$$

λ_o étant la longueur d'onde.

Ainsi la figure d'interférence enregistrée se présente sous la forme d'anneaux concentriques dont la position du centre renseigne sur les coordonnées transverses (x_0, y_0) de la particule

(Figure 4-29). L'information de positionnement longitudinal z_0 de la particule est contenue dans la modulation de fréquence des oscillations de la fonction de Fresnel.

A partir de l'hologramme numérique H_N , on peut reconstruire chaque plan du volume holographié. La restitution numérique consiste à simuler la diffraction d'une onde plane par l'hologramme. Pour un plan restitué à une distance z_R donnée et dans l'approximation de Fresnel, ceci revient à convoluer l'hologramme par la fonction de Fresnel de paramètre z_R correspondant à la distance de restitution :

$$\underline{A}_{z_R}(X, Y) = H_N * \underline{h}_{z_R}(X, Y) \quad (4.42)$$

Numériquement cette restitution est réalisée par Transformée de Fourier Rapide. La distance z_R peut être assimilée à une échelle et la reconstruction en différents plans (Figure 4-29) à une transformée en ondelette de l'hologramme à différentes échelles (Burrage-Lefebvre et *al.*, 2000). Les particules de position $Z_0 \sim Z_R$ apparaissent nettes. Les autres présentent des figures d'anneaux concentriques (Figure 4-29).

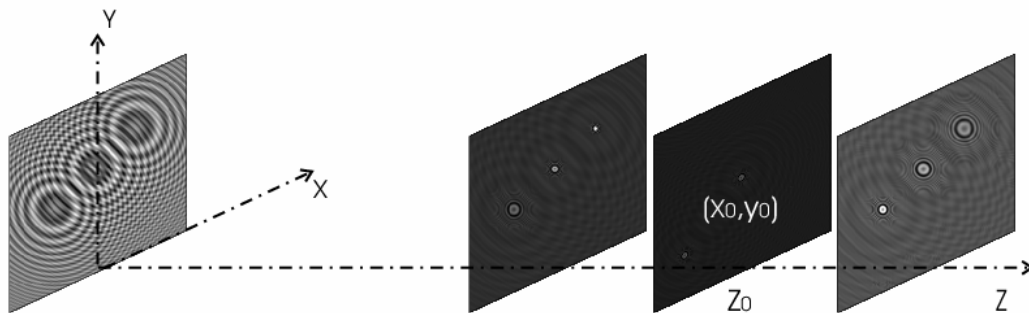


Figure 4-29 : Principe de restitution d'un hologramme.

4.2.2. Insertion d'un objectif

Dans un montage classique d'holographie numérique en ligne, l'image est enregistrée directement sur le capteur CCD ce qui entraîne deux inconvénients majeurs :

- Le volume d'étude est limité transversalement aux dimensions de la caméra CCD.
- Les distances d'enregistrement optimales sont faibles et il n'est pas toujours possible en pratique de placer le capteur proche de la distance optimale d'enregistrement.

L'insertion d'un objectif va assurer plus de flexibilité au dispositif d'holographie numérique. Dans cette étude menée en collaboration avec C. Fournier, nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'un objectif de mise au point à longue distance dans un montage en ligne. Parce qu'il permet un positionnement de la caméra à une plus grande distance de l'écoulement et un réglage de son grandissement, il assure une plus grande souplesse d'utilisation.

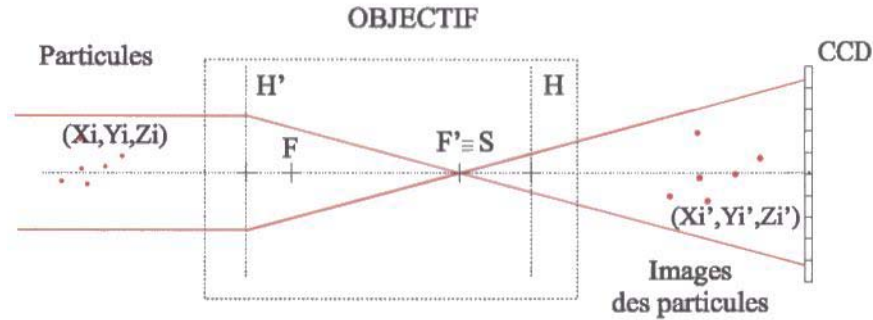


Figure 4-30 : Illustration de l'effet d'un objectif standard introduit dans un dispositif d'holographie en ligne.

L'introduction d'un objectif dans un montage d'holographie numérique en ligne à deux conséquences (Figure 4-30) :

- Le faisceau laser (onde de référence) n'est plus collimaté à la sortie de l'objectif,
- Le capteur CCD enregistre les interférences des ondes issues de l'image des particules avec l'onde de référence après la traversée de l'objectif.

Par conséquent, la restitution d'une particule ne donnera pas la position de la particule éclairée par une source de lumière collimatée, mais la position de l'image de cette particule éclairée par un faisceau divergent (Figure 4-30).

Le positionnement transversal des particules dépend uniquement de grandissement de l'objectif, mais le positionnement axial dépend des caractéristiques du système optique. Par conséquent, une étape d'étalonnage est nécessaire. Cette étape consiste à trouver une relation entre les positions réelles des particules et leurs positions dans le volume reconstruit numériquement. Plus de détails concernant cette étape d'étalonnage sont donnés dans Fournier, 2003.

4.2.3. Détection des particules par palpé morphologique

La restitution numérique nous permet de calculer l'image restituée dans un plan quelconque du volume. Il s'agit donc de segmenter ce volume restitué pour repérer la position 3D de toutes les particules. La segmentation est réalisée en deux étapes : une étape de détection et une étape de localisation et positionnement.

La détection a pour but de détecter la présence d'une particule. Elle se fait en segmentant un plan restitué de manière à détecter toutes les particules focalisées situées au voisinage de ce plan. Le positionnement consiste à localiser précisément chaque particule en x , y et z .

Classiquement (Murata et Yasuda, 2000), ce positionnement se fait en déterminant d'abord les coordonnées (x_i, y_i) transversalement, puis la position z_i . On obtient cette dernière en

cherchant le maximum du profil de l'amplitude restituée $A_{z_R}(x_i, y_i)$ en fonction de z_R . Le principal problème de cette technique se situe au niveau de la détection des particules. On utilise généralement uniquement un critère d'intensité ce qui peut engendrer des problèmes du fait du faible rapport signal sur bruit des images restituées.

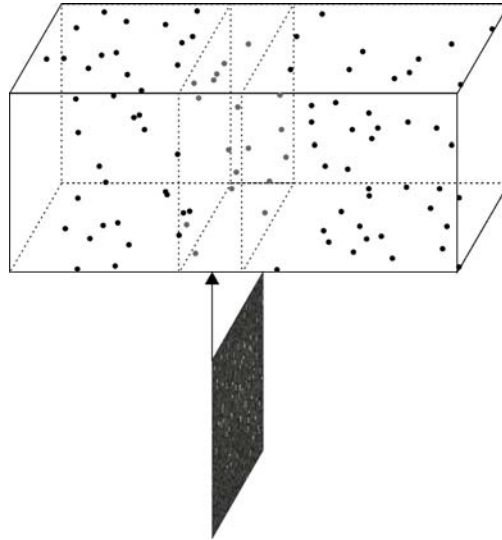


Figure 4-31 : Principe de segmentation des particules d'une tranche du volume reconstruit.

Des techniques de seuillage classique ont été appliquées (Pan et Meng, 2003, Murata et Hidaka, 2002), mais Fournier, 2003, a montré que ces techniques ne sont pas exploitables pour des tranches minces.

La méthode que nous avons utilisée est celle proposée par C. Barat (Barat et *al.*, 2003), qui est basée sur l'utilisation des outils de palpation et définie dans le contexte de la morphologie mathématique. Elle tient compte non seulement de l'intensité mais aussi de la forme de la particule dans un plan restitué. Il s'agit d'appliquer une transformée de mise en correspondance de formes, appelée transformée VDIP (Virtual Double-side Image Probing), basée sur le principe du palpation de surface mécanique et capable de localiser simultanément des objets à niveaux de gris de formes variables.

Dans un premier temps, nous allons décrire rapidement le principe de la transformée VDIP, puis nous verrons son application à la sélection de particules.

4.2.3.1. Transformée VDIP

La Figure 4-32 montre les images reconstruites d'une particule et les profils d'intensité correspondants. On constate que dans les plans proches de la mise au point d'une particule, la forme de son profil varie plus significativement que son intensité.

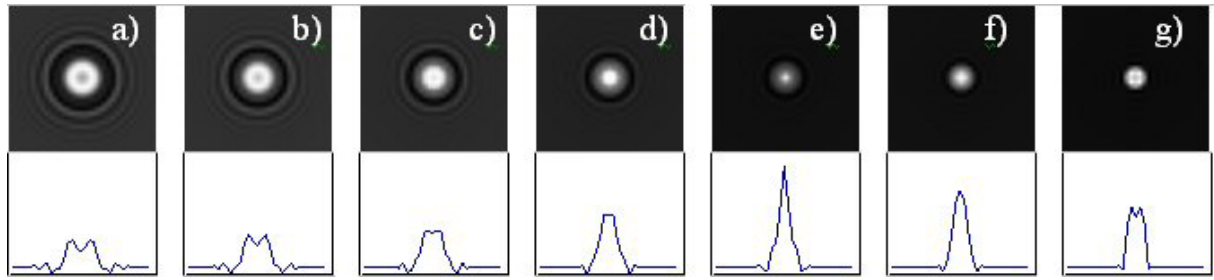


Figure 4-32 : Images reconstruites et profils correspondants d'une particule placée à 50 mm du capteur, selon l'axe (z) (a) $z = 47$ mm, (b) $z = 47.5$ mm, (c) $z = 48$ mm, (d) $z = 48.5$ mm, (e) $z = 49$ mm, (f) $z = 49.5$ mm, (g) $z = 50$ mm.

De plus dans le plan de l'image de cette particule, le profil est le plus contrasté et le pic plus étroit. C'est ce profil que l'on cherche à détecter avec la transformée VDIP. Cette transformée, utilise deux fonctions de référence distinctes, notées t_{inf} et t_{sup} , permettant de former un gabarit contenant la fonction représentative t de l'objet à localiser. L'écart A entre t_{inf} et t_{sup} à la position de centrage sert de critère de décision (Figure 4-33 (a)).

Les fonctions t_{inf} et t_{sup} sont utilisées comme des palpeurs de surface. Elles sont amenées au contact de la surface image simultanément par dessous et par dessus, ce qui correspond mathématiquement aux opérations morphologiques d'érosion et dilatation fonctionnelles de f par les deux palpeurs. Notant ε et δ les opérateurs d'érosion et dilatation, la définition de la transformée VDIP s'écrit :

$$VDIP_{(t_{\text{inf}}, t_{\text{sup}})}(f) = \delta_{-t_{\text{sup}}}(f) - \varepsilon_{t_{\text{inf}}}(f) \quad (4.43)$$

Elle fournit l'écart entre les palpeurs en chaque point de centrage. On montre qu'un objet est détecté lorsque ce résultat est inférieur à A . Par exemple, sur la Figure 4-33, deux objets sont détectés aux positions $x1$ et $x2$.

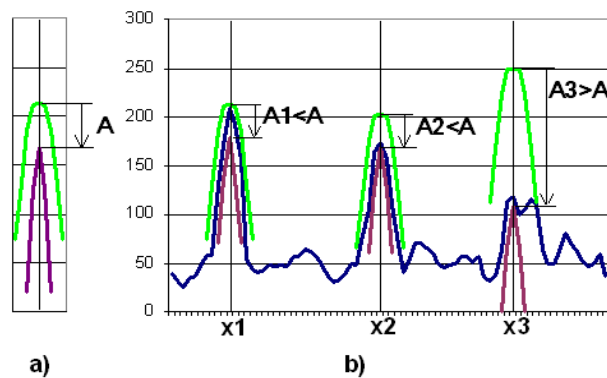


Figure 4-33 : Principe de la transformée VDIP.

4.2.3.2. Application à la localisation de particules dans les jets

Dans notre application à la localisation de particules dans les jets, pour détecter les particules focalisées au moyen de la transformée VDIP, nous utilisons une paire d'éléments structurants cylindriques, qui délimitent le graphe de la fonction représentative d'un pic correspondant à une particule focalisée (Figure 4-34). Nous utiliserons également une paire d'éléments structurant adaptée aux systèmes d'anneaux.

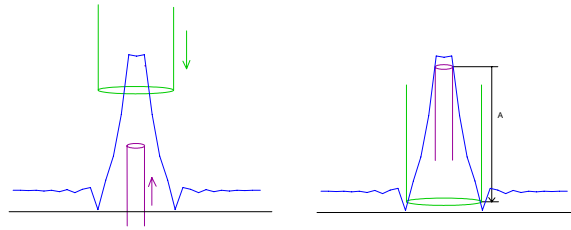


Figure 4-34 : Palpeurs cylindriques utilisés pour la détection de particules focalisées.

Les valeurs des rayons des cylindres permettent donc de ne sélectionner que certaines formes de pics. Plus ces valeurs sont proches, plus le modèle est sélectif. Le paramètre A est relatif à l'intensité. En pratique, les valeurs à choisir peuvent être déterminées à partir de simulations. Les éléments structurants cylindriques présentés précédemment correspondent simplement à des éléments plans circulaires. Le calcul de la transformée VDIP en chaque pixel nécessite des opérations de comparaison pour la recherche de minimum et de maximum. Comme le rapport signal sur bruit est relativement faible sur les plans restitués, il est nécessaire d'utiliser du filtrage d'ordres statistiques (Agam et Dinstein, 1996). Les expressions généralisées des opérations d'érosion et de dilatation remplacent alors les expressions classiques dans l'équation (4.43).

Dans le but de tester et comparer les différentes méthodes, nous avons simulé des hologrammes de microparticules. Un nuage de 1000 particules de même diamètre $30\ \mu\text{m}$ (positions $(X_i; Y_i; Z_i)_{i=1:N}$) réparties aléatoirement dans un volume de $6.8\ \text{mm} \times 6.8\ \text{mm} \times 3.6\ \text{mm}$ à $50\ \text{mm}$ du capteur a été simulé, puis l'onde diffractée par ce nuage a été calculée. Nous travaillons sur des images de taille 512×512 pixels extraites au centre des plans restitués de taille 1024×1024 pixels afin de s'affranchir des problèmes de bord. Ces images contiennent environ 250 particules. Un extrait de l'hologramme obtenu ainsi qu'une image restituée sont fournis sur la Figure 4-35.

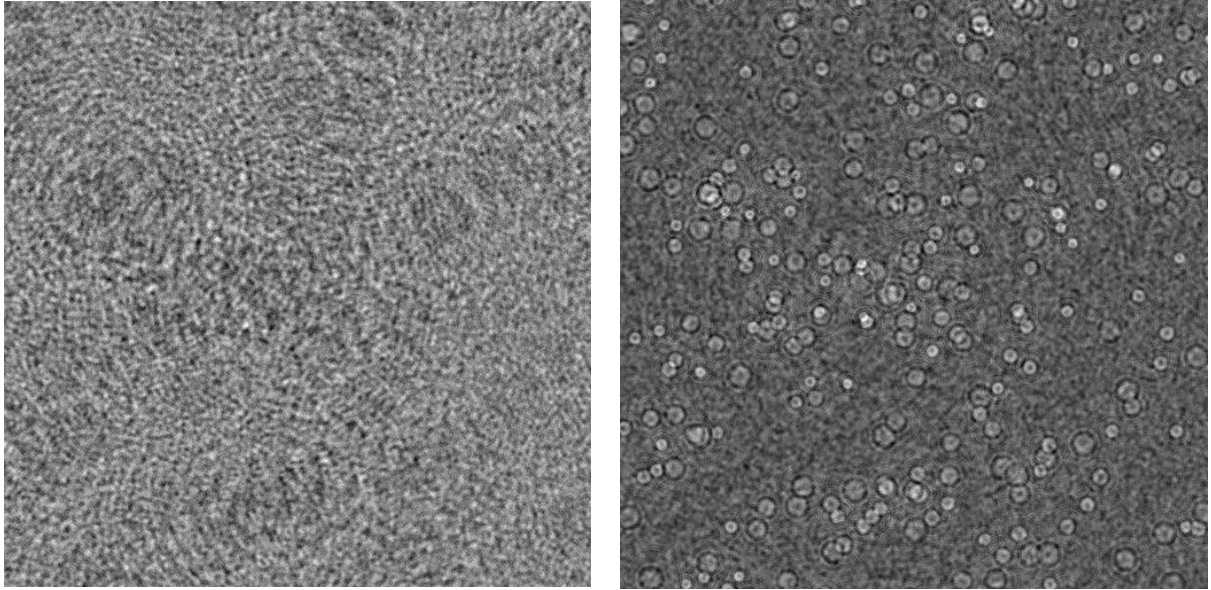
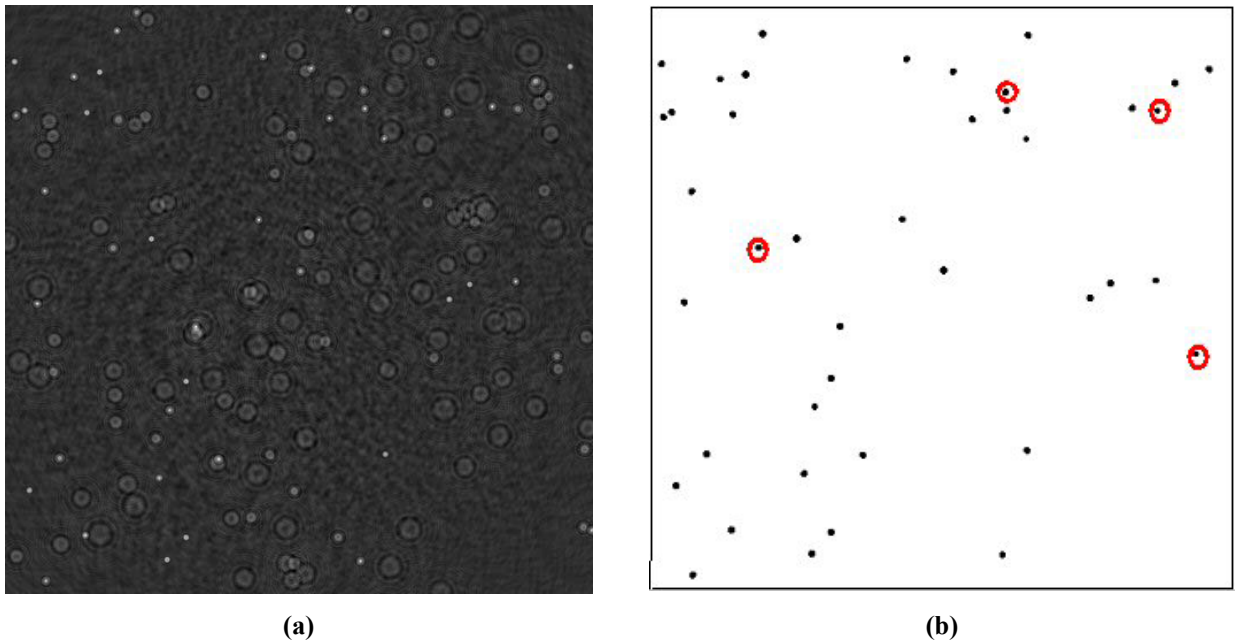


Figure 4-35 : (a) extrait d'un hologramme simulé de 1000 particules (512*512 pixels), (b) exemple de plan restitué (512*512 pixels).

Nous présentons deux résultats de segmentation d'un même ensemble de particules contenues dans une tranche de 800 μm d'épaisseur, à partir de deux plans restitués à partir de l'hologramme de la Figure 4-35.



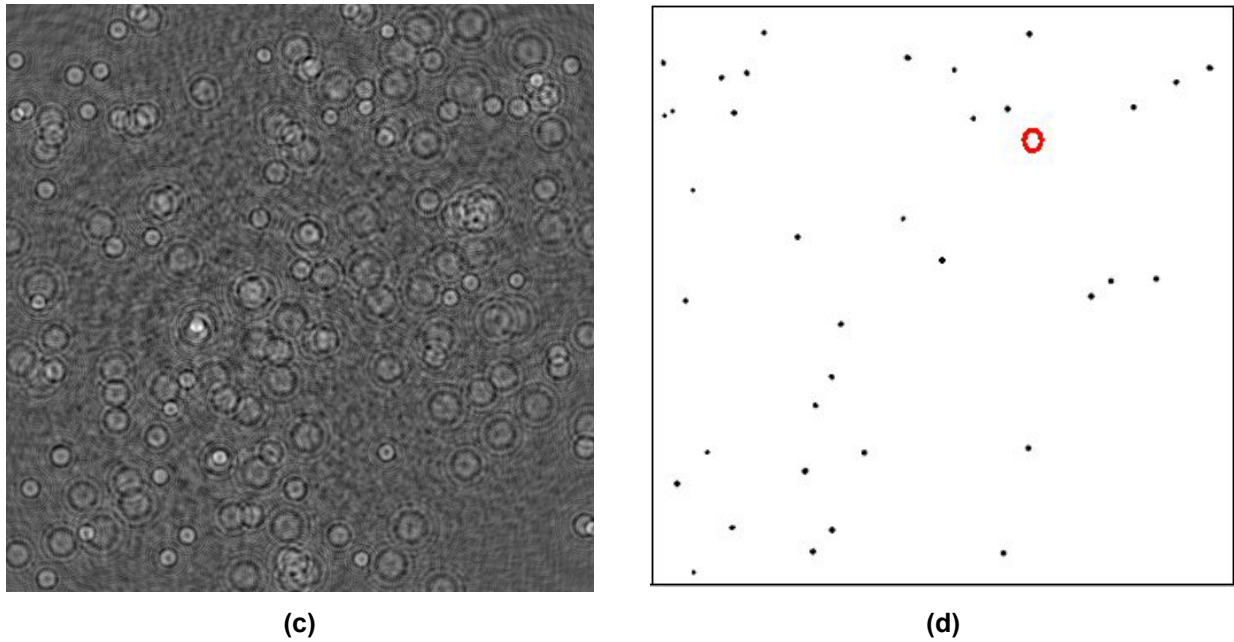


Figure 4-36 : Résultats de segmentation par palpation d'un même ensemble de particules à partir de deux plans restitués différents : (a) plan reconstruit à $z=44\text{mm}$ contenant les particules focalisées, (b) résultat de segmentation avec les erreurs en rouge, (c) plan reconstruit à $z=41\text{mm}$ du capteur contenant les mêmes particules défocalisées, (d) résultat de segmentation.

L'image de la Figure 4-36 (b) correspond à la segmentation de particules proches de la mise au point. L'image de la Figure 4-36 (d) correspond à la segmentation des mêmes particules dans un plan éloigné du plan de mise au point. Dans le premier cas, le nombre de fausses détections s'élève à 4. Il s'agit de 4 particules qui n'auraient pas dû être détectées. Dans le second cas, une erreur apparaît qui est une particule manquante. Ces fausses détections s'expliquent principalement par les interférences et le bruit engendrés par les motifs de diffraction voisins. On constate que la paire de palpeurs adaptée aux particules focalisées est plus sensible que la paire adaptée aux systèmes d'anneaux. Les particules focalisées ne sont représentées que par 4 pixels de forte intensité en moyenne. Dès lors que le nombre de particules est élevé, les valeurs de ces 4 pixels ont une de forte probabilité d'être perturbées par le voisinage. Il est donc difficile d'analyser cette trop faible quantité d'information. Il est préférable dans ce cas de rechercher des systèmes d'anneaux, qui comptent davantage de pixels.

A partir de ce résultat, il est intéressant de souligner que l'approche de segmentation par palpation permet de sélectionner des ensembles de particules de différentes tranches à partir d'un même plan restitué en jouant sur différentes combinaisons de palpeurs.

Chapitre 5. Validation et Résultats

Les systèmes de caractérisation de sprays diesel décrits précédemment permettent d'obtenir des mesures de façon automatique à partir des images par lumière diffusée en grand champ et encore de façon manuelle pour ce qui concerne les images ombroscopiques et holographiques en petit champ. Nous montrerons que certaines observations sur petit champ telles que la détection du début d'injection ou la mesure de l'angle microscopique pourront être facilement automatisées. Dans une première partie, nous allons nous intéresser à la mesure des paramètres morphologiques des jets puis dans une seconde partie nous étudierons les images microscopiques et enfin nous aborderons les résultats concernant l'holographie numérique.

5.1. Mesure des paramètres morphologiques

Dans cette partie, nous présentons les résultats concernant les paramètres morphologiques des sprays obtenus avec différents types d'injecteurs à partir d'images réalisées en lumière blanche (montage Figure 3-10).

Dans un premier temps nous allons présenter le type de courbes que nous pouvons obtenir en sortie de traitement. Nous étudierons l'évolution de la pénétration, de l'angle et de la richesse pour deux injecteurs ceci pour différentes conditions d'injection et de contre pression. Puis nous comparerons nos mesures de pénétration et d'angle aux lois empiriques proposées par Dent et Hiroyasu. Nous verrons comment modifier la loi de pénétration proposée par Hiroyasu pour qu'elle suive nos mesures de pénétration. Une étude de l'écart type des mesures sera également réalisée.

Les paramètres expérimentaux sont rassemblés dans le Tableau 5-1. Les masses volumiques de l'huile ρ_l et de l'azote ρ_g sont recalculées en fonction des conditions expérimentales selon les équations données en Annexe 5 et 6. La densité de l'huile est évaluée à la pression chambre et non à la pression rail car nous étudions l'évolution du spray. μ_g représente la viscosité dynamique du gaz et T_l la température de l'huile.

P_{inj} (en MPa)	CP (en MPa)	ρ_l (en kg/m ³)	ρ_g (en kg/m ³)	μ_g (à 50 °C) (en Pa s)	T_l (en K)	Fréquence d'injection (en Hz)	Durée injection (en ms)	Résolution ($\mu\text{m/p}$)	Temps exposition (en ns)
80	2.5	813	26.9	18.8 10 ⁻⁵	313 (40°C)	0.2	1.5	150	200
	3.5	813.7	37.66						
120	2.5	813	26.9						
	3.5	813.7	37.66						

Tableau 5-1 : Paramètres expérimentaux.

5.1.1. Nombre d'images, moyennes

Compte tenu des variations cycle à cycle au cours des injections successives, l'étude de la pénétration et de l'angle du jet ainsi que la richesse du milieu se fera de manière statistique sur une population d'images représentant l'injection comme nous l'avons présenté au chapitre 3.

5.1.1.1. Détermination du nombre d'images nécessaires

Pour réaliser une étude statistique, nous devons enregistrer un certain nombre d'image par instant. Combien d'images doivent être enregistrées pour que la statistique soit correct ? C'est à cette question que nous allons tenter de répondre dans ce paragraphe.

Pour déterminer le minimum d'images nécessaire, nous nous basons sur l'estimation de l'erreur relative par rapport à un échantillon maximum de 50 images (Maunoury, 2001)

L'erreur absolue est définie comme l'écart entre la valeur moyenne Q^* calculée sur l'ensemble des images de l'échantillon et la valeur de la moyenne Q sur n images prises dans cet échantillon ($0 < n < 50$) :

$$E = \Delta Q = |Q - Q^*|$$

L'erreur relative est l'erreur absolue par rapport à la valeur précise

$$E_r = E / |Q|$$



(a) Moyenne de 25 images sur 50



(b) Moyenne de 40 images sur 50



(c) Moyenne de 49 images sur 50

Figure 5-1 : Visualisation de l'erreur relative.

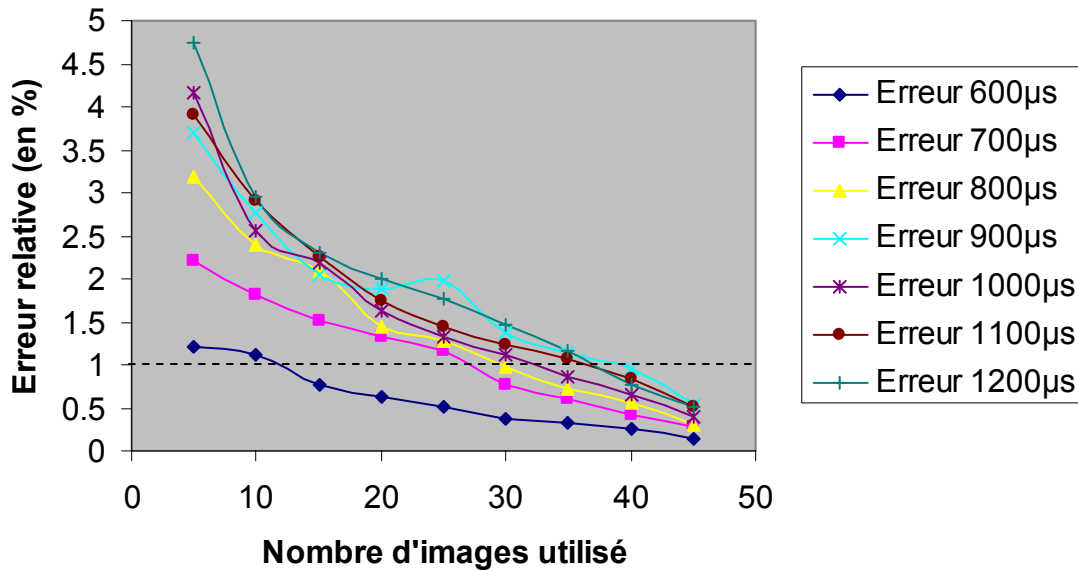


Figure 5-2 : Erreur relative en fonction du nombre d'images utilisées.

Il s'avère, sur cet exemple, qu'une population de 40 images serait suffisante. En effet pour tous les instants de visualisation, les courbes d'erreur relative passent sous la barre des 1% d'erreur relative avant 40 échantillons. Cependant, il est intéressant de voir que l'on peut dissocier de cet exemple des comportements différents suivant que l'instant de prise d'images est proche de l'injection, où qu'il se situe plus tard dans le cycle. Le phénomène est plus stable en début d'injection qu'en fin d'injection, moins d'images seraient nécessaires si l'on s'intéressait uniquement au début de l'injection. Attention, nous verrons plus loin, dans la présentation des résultats que cette remarque dépend de l'injecteur utilisé.

Pour confirmer cette étude, nous avons enregistré un échantillon de 100 images au même instant pour 1100, 1400 et 1700 µs après le SOI, et nous avons effectué les mesures de pénétration, angle et volume pour chaque image. Nous avons supposé que la valeur moyenne obtenu des paramètres mesuré sur les 100 images était la valeur exacte et avons calculé l'erreur avec une moyenne de 10, 20, 30, ..., 80 et 90 images.

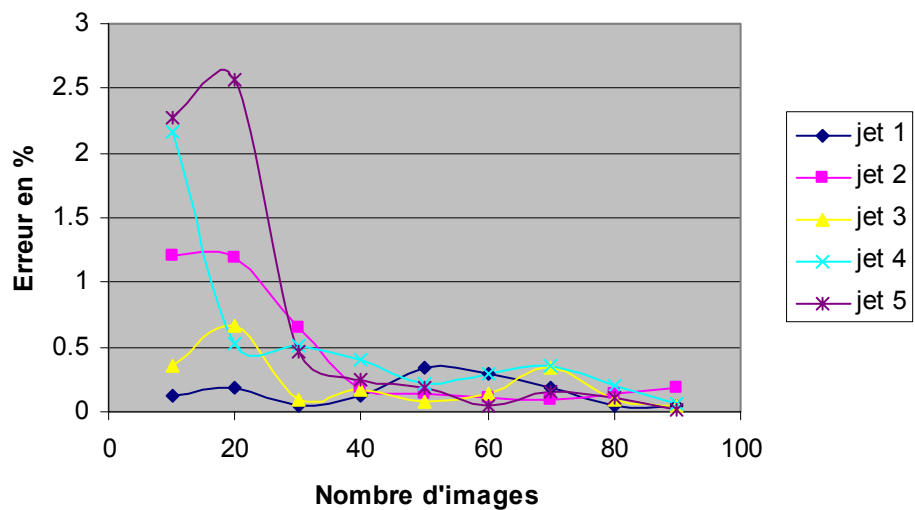


Figure 5-3 : Erreur en %, sur la pénétration des jets à 1100 μ s après SOL.

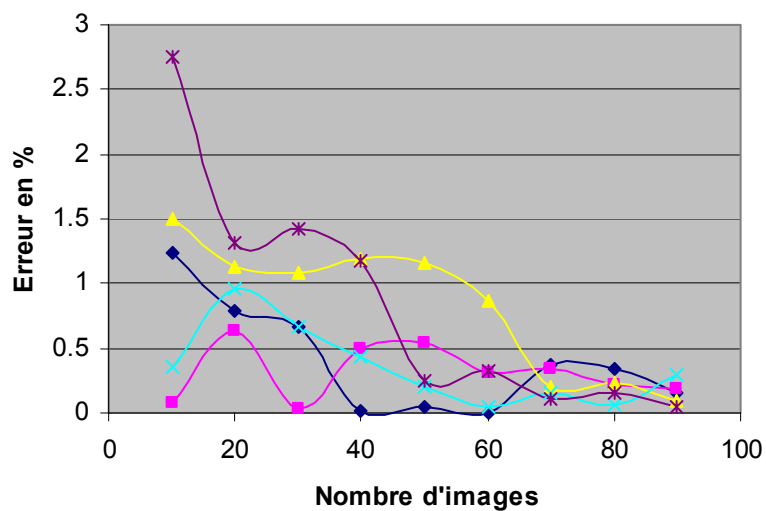


Figure 5-4 : Erreur en %, sur l'angle des jets à 1100 μ s après SOL.

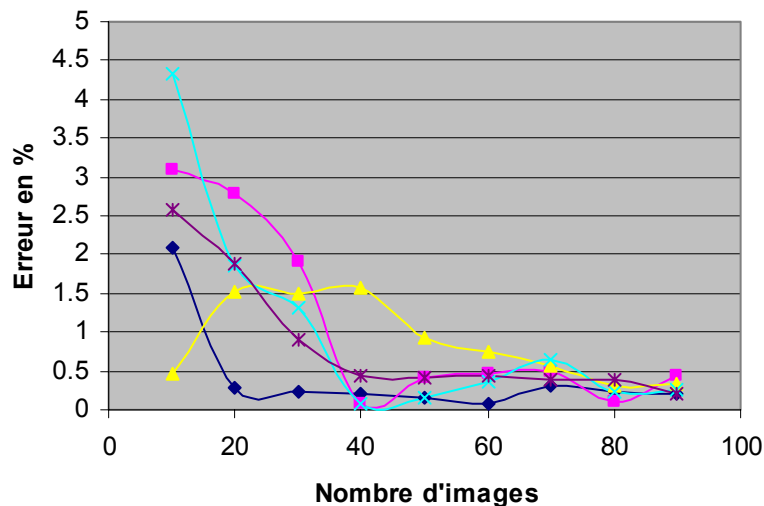


Figure 5-5 : Erreur en %, sur le volume des jets à 1100 μ s après SOI.

On constate qu'il faut pour avoir une erreur inférieure à 1,5 % :

- 30 images minimum pour la pénétration ;
- 40 images minimum pour l'angle ;
- 40 images minimum pour le volume.

Par conséquent 40 images semblent un bon compromis pour le nombre d'acquisition d'images afin d'obtenir une erreur inférieure au maximum à 1%.

5.1.1.2. Comparaison résultats image moyenne et moyenne des mesures

Connaissant le nombre d'images à réaliser pour obtenir une bonne statistique, doit on maintenant mesurer l'ensemble des paramètres morphologiques (pénétration, angle et volume) définis au chapitre 1 et 4 pour chaque image puis en faire la moyenne, ou réaliser une image moyenne et ensuite mesurer les paramètres sur cette unique image ? Ceci n'étant valable, si la connaissance de l'écart type n'est pas utile.

Cette étude a été réalisée avec l'injecteur 1 pour une pression d'injection de 80 MPa et une contre pression de 2.5 MPa.

Pénétration

Nous allons comparer deux à deux, la pénétration de 3 jets dans le cas où la pénétration est calculée sur la moyenne des images (Jet Image moyenne) et dans le cas où la pénétration est obtenue à partir de la moyenne des résultats de pénétration obtenue pour chaque image.

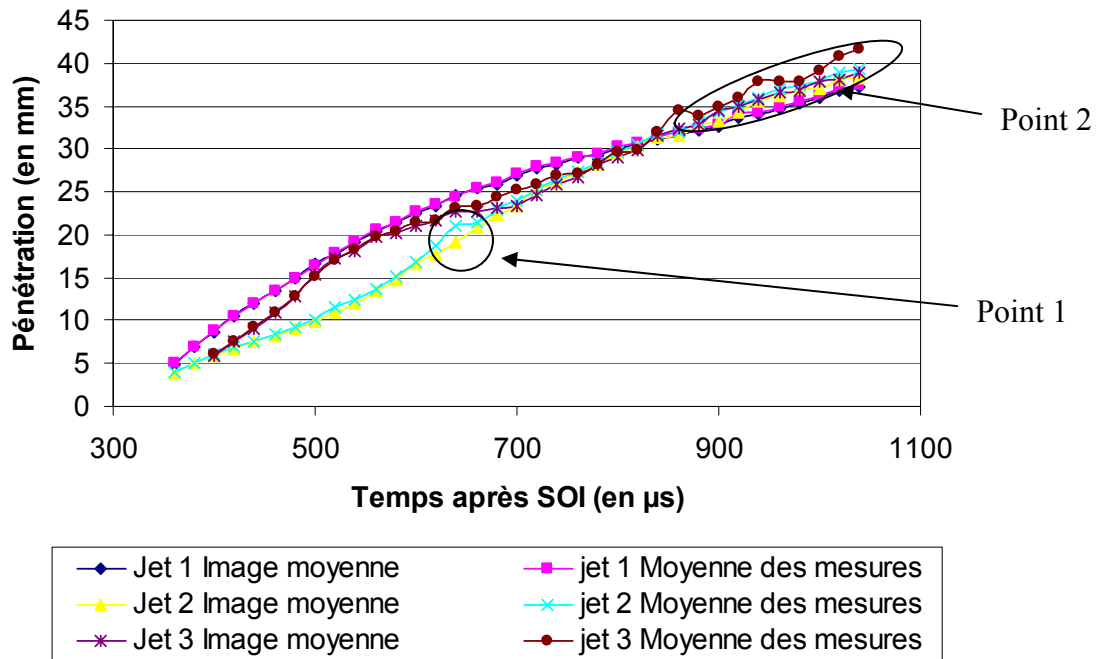


Figure 5-6 : Comparaison entre : mesure sur image moyenne et moyenne des images pour la pénétration (Injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5MPa).

En comparant trois jets (jet 1, 2 et 3), provenant de 3 trous avec des angles d'injection différents (87.73° , 66.7° , 53.5°), on peut s'apercevoir, notamment au niveau du jet 3 que en fin d'injection la courbe est plus lisse. Par contre pour le jet 1, 2, les courbes se superposent très bien.

La différence entre les 2 modes de calcul de la pénétration pour le jet 1 est au maximum de 1.1 % (moyenne 0.5 %), pour le jet 2 de 8% (point 1) sinon en moyenne 2.1%, et pour le jet 3 notamment en fin d'injection 7% (point 2) avec une moyenne à 2.5%.

Angle

Comme pour la pénétration, nous allons comparer deux à deux, l'angle de 3 jets dans le cas où l'angle est calculé sur la moyenne des images (Jet Image moyenne) et dans le cas où l'angle est obtenu à partir de la moyenne des résultats de l'angle obtenue pour chaque image.

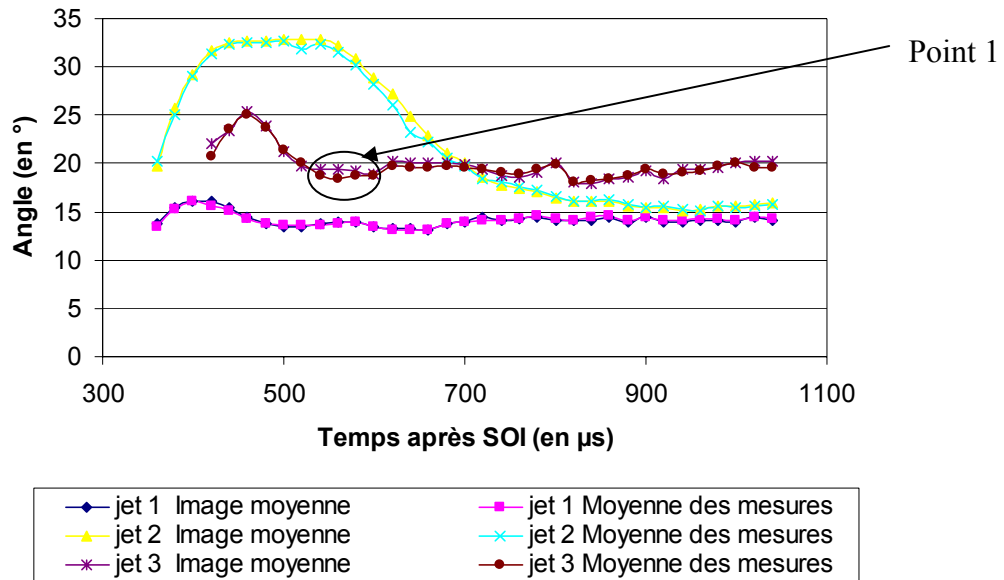


Figure 5-7 : Comparaison entre : mesure sur image moyenne et moyenne des images pour l'angle (Injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5MPa).

Pour la mesure de l'angle, le fait de moyenner les images ou de faire la moyenne à partir des mesures ne change pas grand-chose. Par rapport à la pénétration, il n'y a pas d'effet de lissage.

La différence entre les 2 modes de calcul de l'angle pour le jet 1 est au maximum de 2% (moyenne 1 %), pour le jet 2 de 6% sinon en moyenne 1.4%, et pour le jet 3 notamment en fin d'injection 6% (point 1) avec une moyenne à 1.7%.

Volume

Nous allons comparer deux à deux, le volume de 3 jets dans le cas où le volume est calculé sur la moyenne des images (Jet Image moyenne) et dans le cas où le volume est obtenu à partir de la moyenne des résultats du volume obtenue pour chaque image.

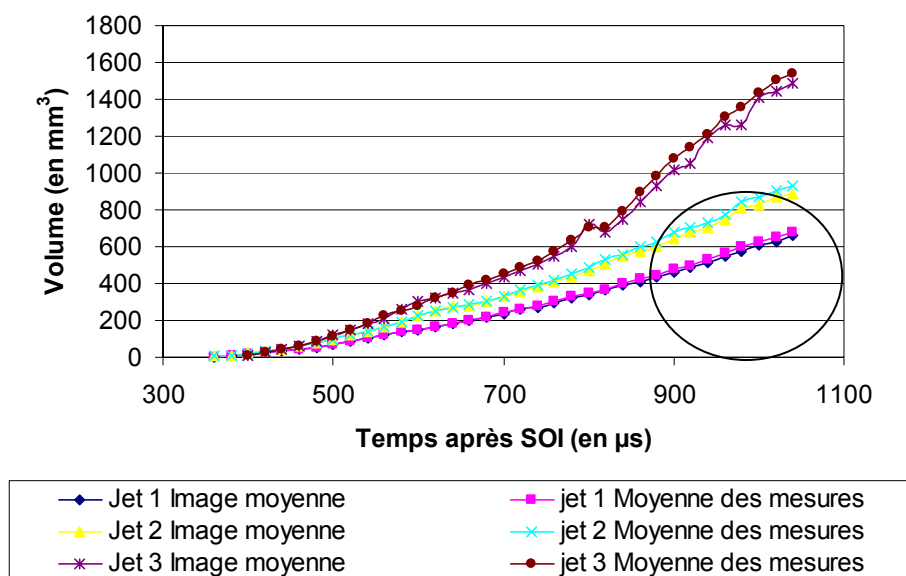


Figure 5-8 : Comparaison entre : mesure sur image moyenne et moyenne des images pour la volume (Injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5MPa).

En comparant les trois jets, on s'aperçoit que pour le jet 1, il y a une bonne superposition. Pour les deux autres jets tracés, on s'aperçoit que la superposition est bonne au début de l'injection, mais que sur la fin il y a un léger décalage.

La différence entre les 2 modes de calcul du volume pour le jet 1 est au maximum de 4% (moyenne 1.9 %), pour le jet 2 de 5% sinon en moyenne 2.6%, et pour le jet 3, 7.6% avec une moyenne à 3.7%. Les différences se font essentiellement sur la fin de l'injection.

Conclusion

La comparaison menée pour une pression d'injection de 80 MPa et une contre pression de 2.5 MPa entre une moyenne de toutes les images et la moyenne des pénétrations, angle, volumes calculés sur chaque jet donne quasiment les mêmes résultats. Mais le temps de calcul, en faisant la moyenne des images et ensuite en calculant les paramètres sur cette seule moyenne est beaucoup plus rapide que de faire le calcul de chaque paramètre sur chaque image. Par contre aucune information sur l'écart type n'est possible ce qui peut s'avérer gênant. Deux options seront alors possible calcul avec écart type ou sans.

5.1.2. Evolution des paramètres

Dans cette partie, nous présentons les courbes obtenues après le traitement présenté au chapitre 4 paragraphe 4.1.3 avec les deux injecteurs (1 et 2) dont les caractéristiques sont données en annexe 4. Nous ne présenterons que les mesures obtenues pour une pression d'injection de 120 MPa et une contre pression de 2.5 MPa, d'autres pressions d'injection et

contre pression peuvent être trouvées en annexe 12. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 4, la pénétration, l'angle et le volume sont obtenus directement à partir des images. Par contre, la richesse est obtenue de façon indirecte. En effet il faut relier nos mesures de volumes réalisées (qui correspondent à un volume global contenant le carburant et le comburant) sur les images avec les mesures de volumes de fluide réellement injecté dans la chambre ce qui peut être obtenu par cartographie de l'injecteur (Figure 5-9 et Annexe 8). La cartographie d'un injecteur représente l'évolution du volume injecté en fonction de la durée d'injection et ceux pour différentes pressions d'injection et contre pression.

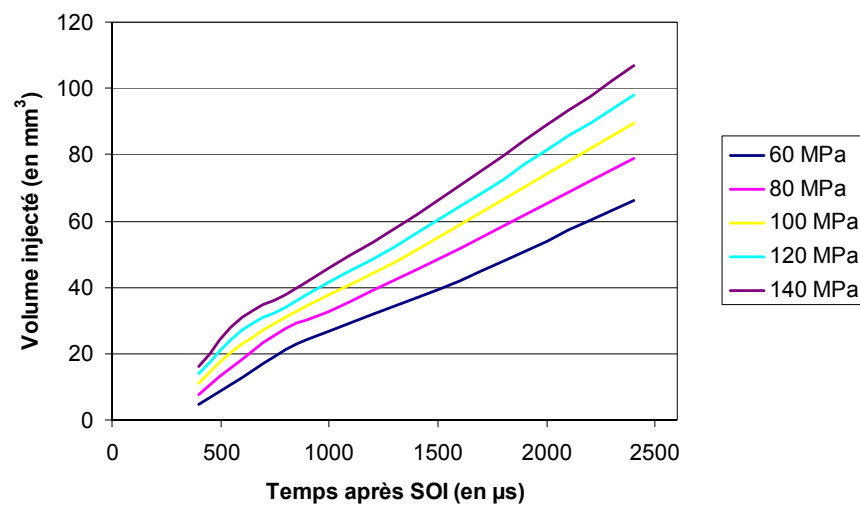


Figure 5-9 : Cartographie de l'injecteur 1 pour une contre pression de 2.5 MPa.

L'étude de l'évolution de ces paramètres au cours de l'injection se fait de manière statistique. Nous avons opté pour la mesure des paramètres sur chaque image puis le calcul de la moyenne de ces résultats, bien que le temps de calcul soit plus long, ceci nous permet de posséder une information concernant l'écart type. Dans les représentations suivantes, chaque point est la moyenne de 40 mesures réalisées pour chaque instant du cycle d'injection.

Ne pouvant fonctionner qu'à une basse fréquence (entre 0.2 et 0.5 Hz maximum), afin d'assurer une bonne évacuation du brouillard formé par l'injection précédente, la caractérisation d'une injection dans des conditions de pression d'injection et de contre pression données prend typiquement, pour une série de 30 points sur l'injection avec 40 images pour chaque point (soit 1200 images), environ 2 heures.

5.1.2.1. Evolution de la pénétration

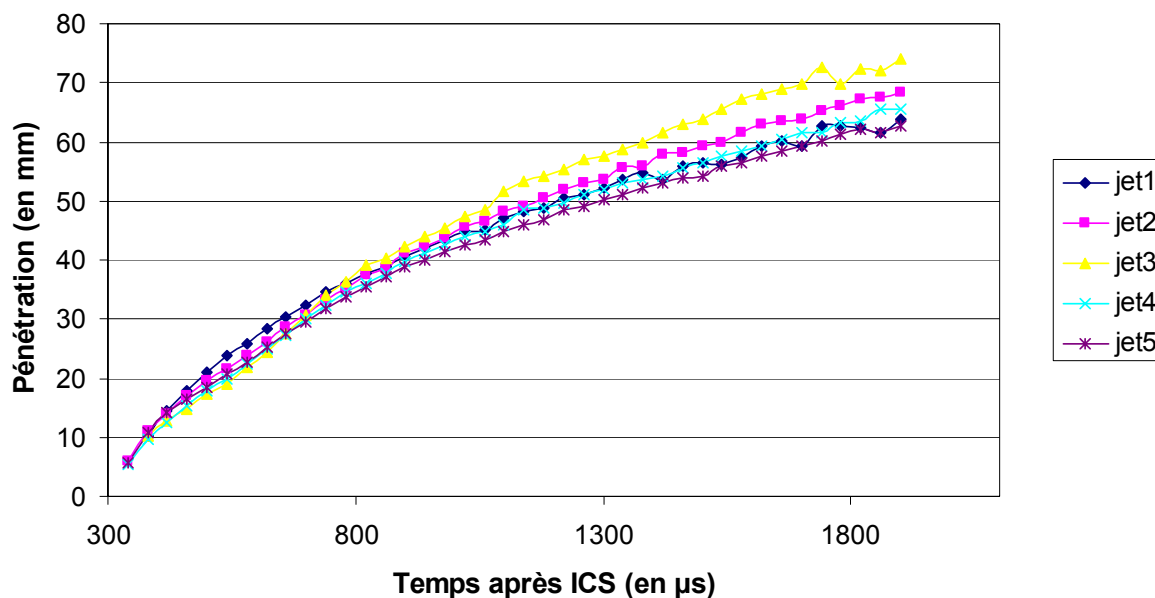


Figure 5-10 : Evolution de la pénétration des jets, injecteur 1, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.

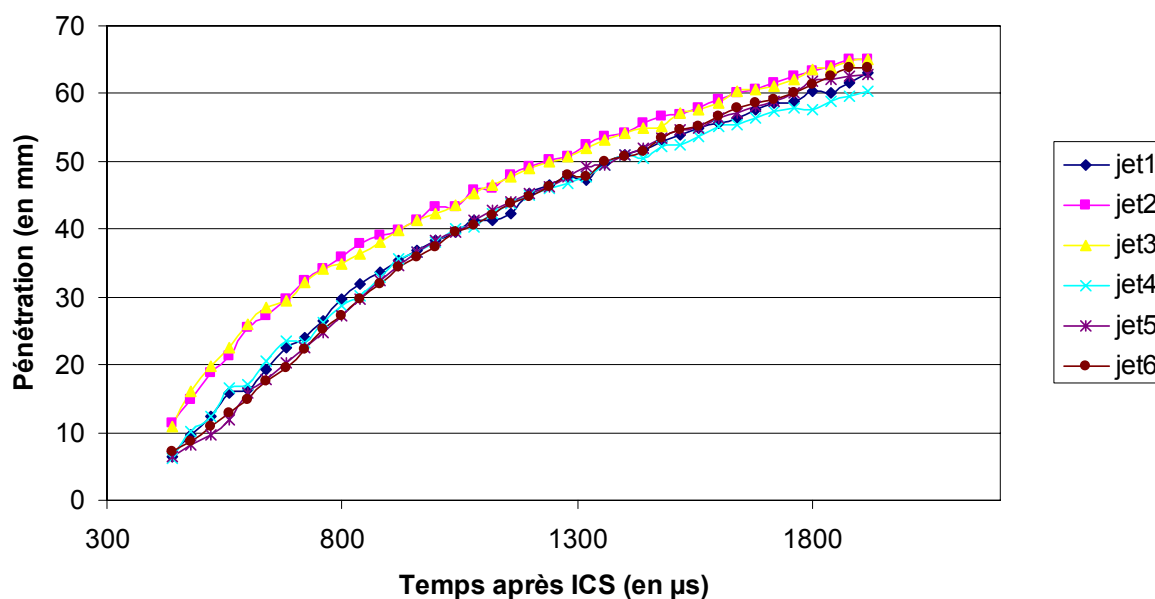


Figure 5-11 : Evolution de la pénétration des jets, injecteur 2, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.

Pour l'injecteur 1 (Figure 5-10), on peut s'apercevoir et ceci a lieu pour les autres pressions d'injection et contre pression utilisées que les pénétrations des jets 1 et 5 et 2 et 4 se suivent très bien. En effet ce sont les jets qui ont le même angle sur le nez de l'injecteur. Au début de l'injection, on peut noter, pour les jets 2 et 4, une pénétration plus faible avant une remontée pour atteindre une pénétration similaire aux autres. Le jet 3 a une pénétration supérieure aux autres jets. Ceci peut être lié à la géométrie de l'injecteur.

Pour l'injecteur 2, tous les trous ont le même angle par rapport à l'axe de l'injecteur. On constate que 4 jets ont une pénétration similaire (jet 1, 4, 5 et 6) alors que les jets 2 et 3 ont une pénétration semblable mais différente des 4 autres. Les jets 2 à 2 tels que 2 et 3 et 5 et 6 se suivent très bien. Par contre 1 et 4 se suivent très bien mais sont opposés par rapport à l'axe de l'injecteur, ce qui est également observable avec d'autres pressions et contre pressions (annexe 12).

5.1.2.2. Evolution de l'angle

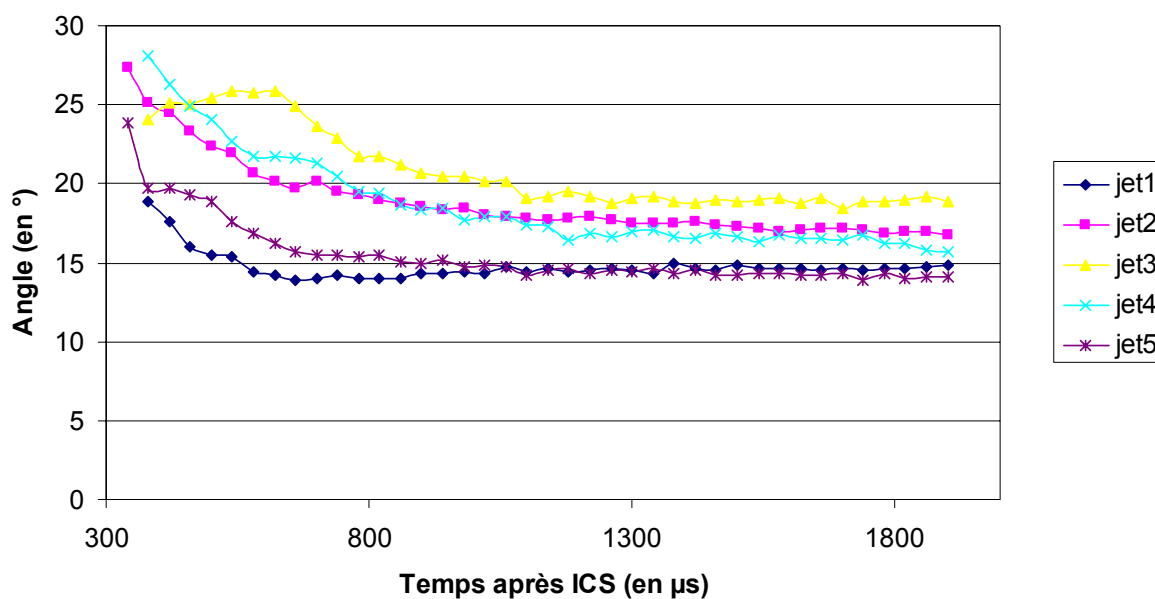


Figure 5-12 : Evolution de l'angle des jets, injecteur 1, P_{inj} 120 MPa, CP 2.5 MPa.

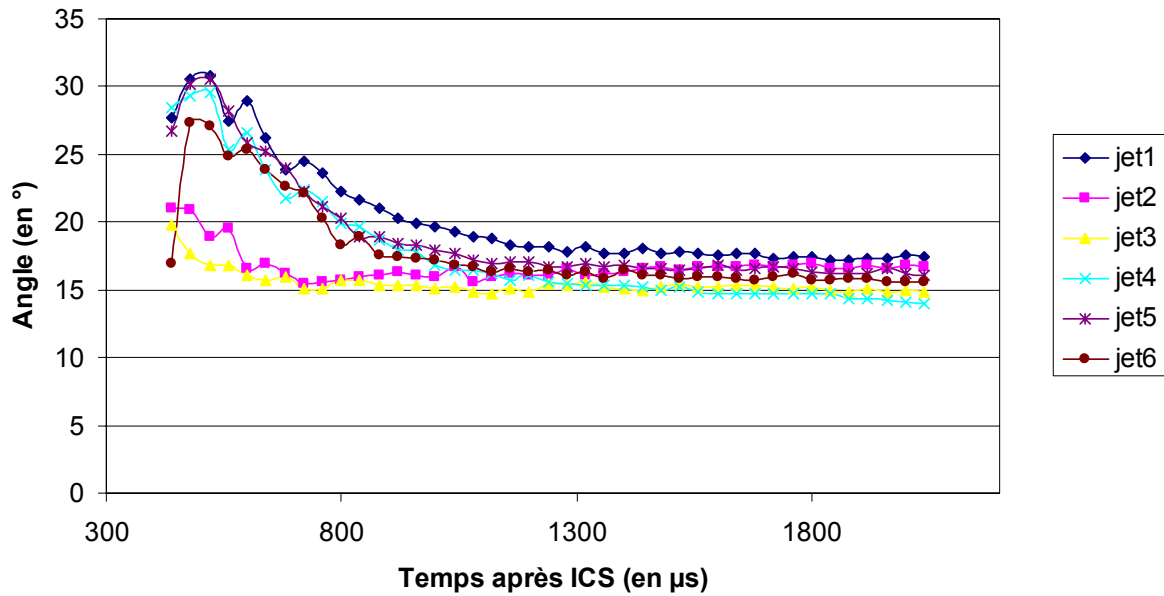


Figure 5-13 : Evolution de l'angle des jets, injecteur 2, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.

On constate, pour l'injecteur 2 (Figure 5-13), que les angles pour chaque trou se suivent de façon très proche et ceci pour n'importe quelle pression d'injection et contre pression. Par contre pour l'injecteur 1 (Figure 5-12) les différences sont très marquées au début de l'injection puis ensuite tous les jets tendent très rapidement en moins de 400 μs vers une valeur constante de 15 degrés alors que pour l'injecteur 2 la valeur asymptotique de 17 degrés n'est atteinte qu'après 600 μs environ.

5.1.2.3. Evolution du volume

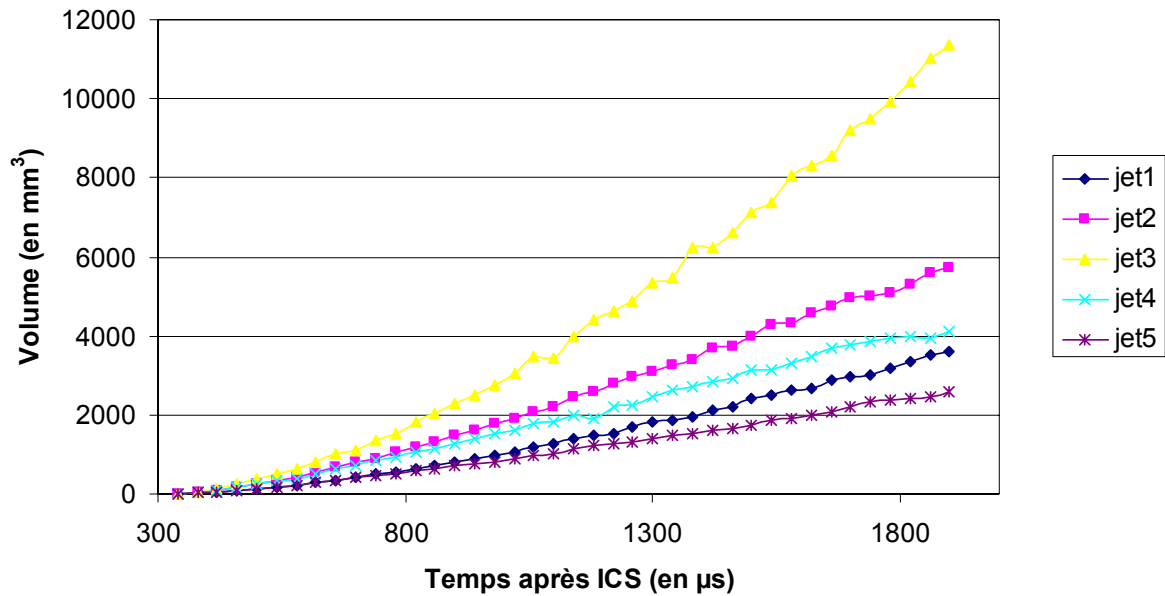


Figure 5-14 : Evolution du volume des jets, injecteur 1, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.

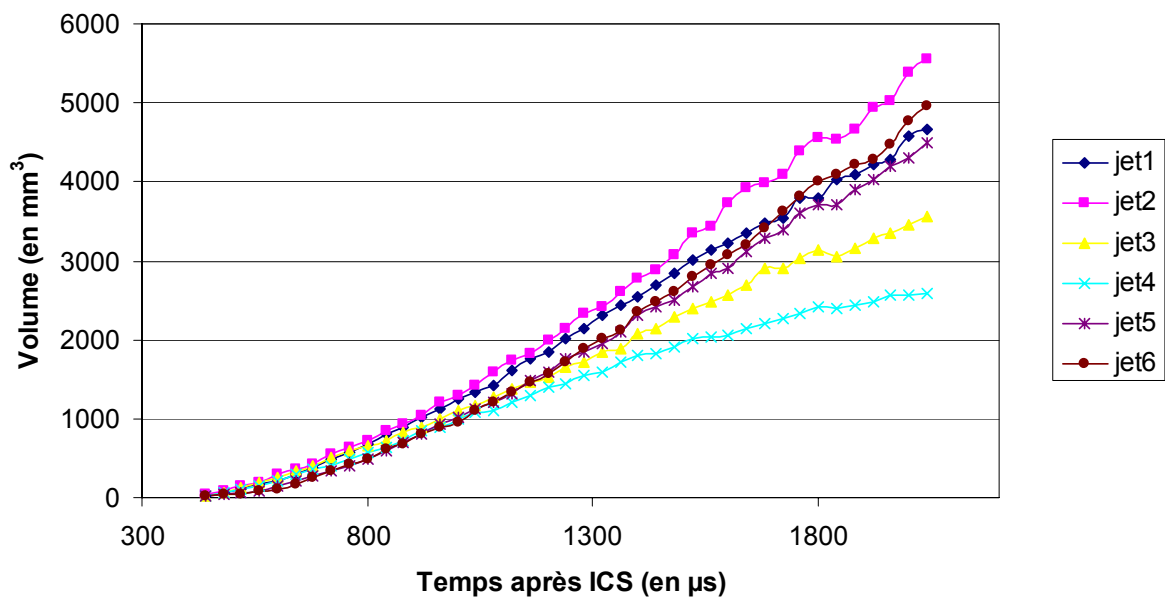


Figure 5-15 : Evolution du volume des jets, injecteur 2, Pinj 120 MPa, CP 2.5 MPa.

On constate que comme pour la pénétration, l'évolution du volume pour l'injecteur 1 (Figure 5-14) est la même selon la position des jets par rapport à l'axe de l'injecteur. De plus le jet 3 a un volume beaucoup plus important que les autres jets. Pour l'injecteur 2 (Figure 5-15), au début d'injection tous les jets ont un volume similaire, mais ensuite vers 900 µs après l'ICS, les volumes commencent à différer. Plus loin dans l'injection, les volumes diffèrent beaucoup plus.

5.1.2.4. Etude de l'influence de la pression et de la contre pression sur un jet

Nous allons présenter ici des résultats concernant l'influence de la pression d'injection et le contre pression sur la pénétration et l'angle des jets.

Nous étudierons les jets 1 et 3 pour les 2 injecteurs utilisés dans les conditions suivantes : pression d'injection 80 MPa et 120 MPa et contre pression 2.5 et 3.5 MPa.

Pénétration :

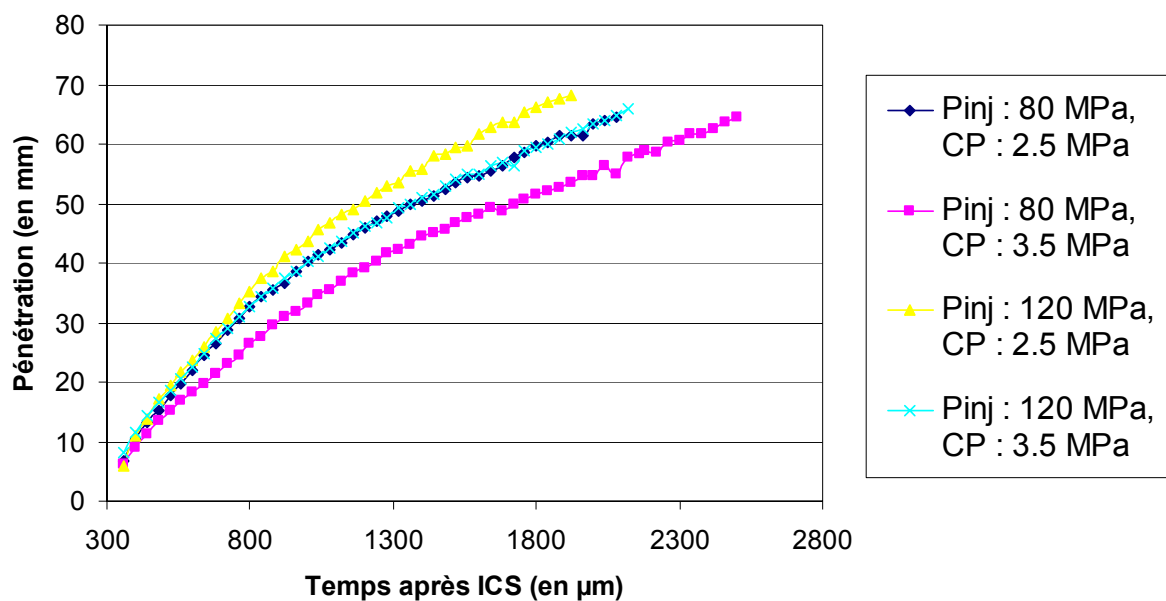


Figure 5-16 : Evolution de la pénétration du jet 2 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.

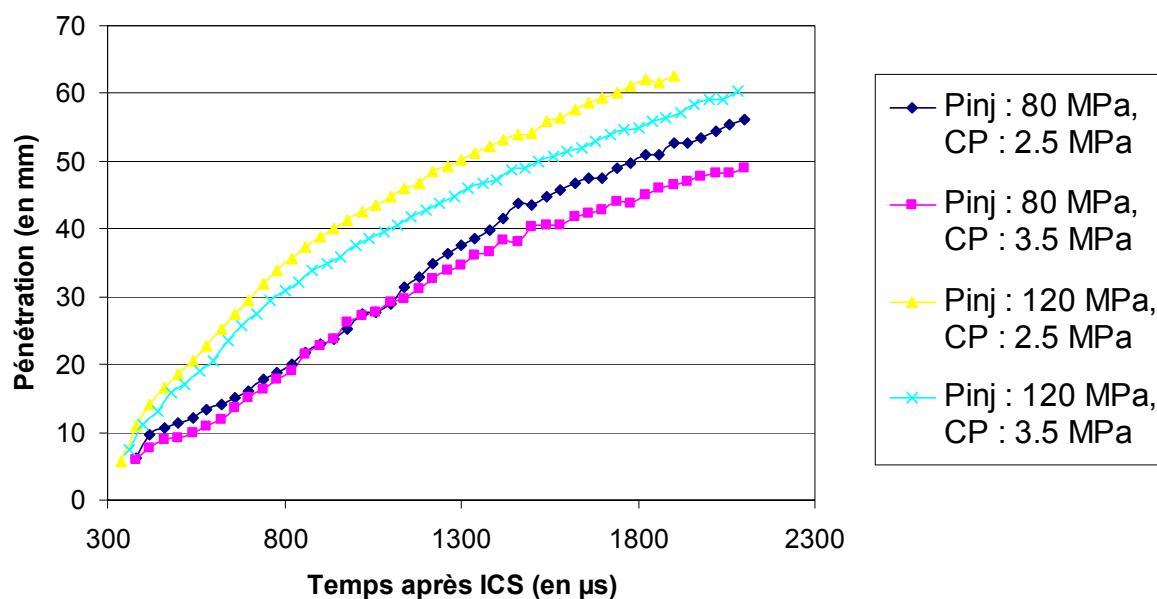


Figure 5-17 : Evolution de la pénétration du jet 5 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pression.

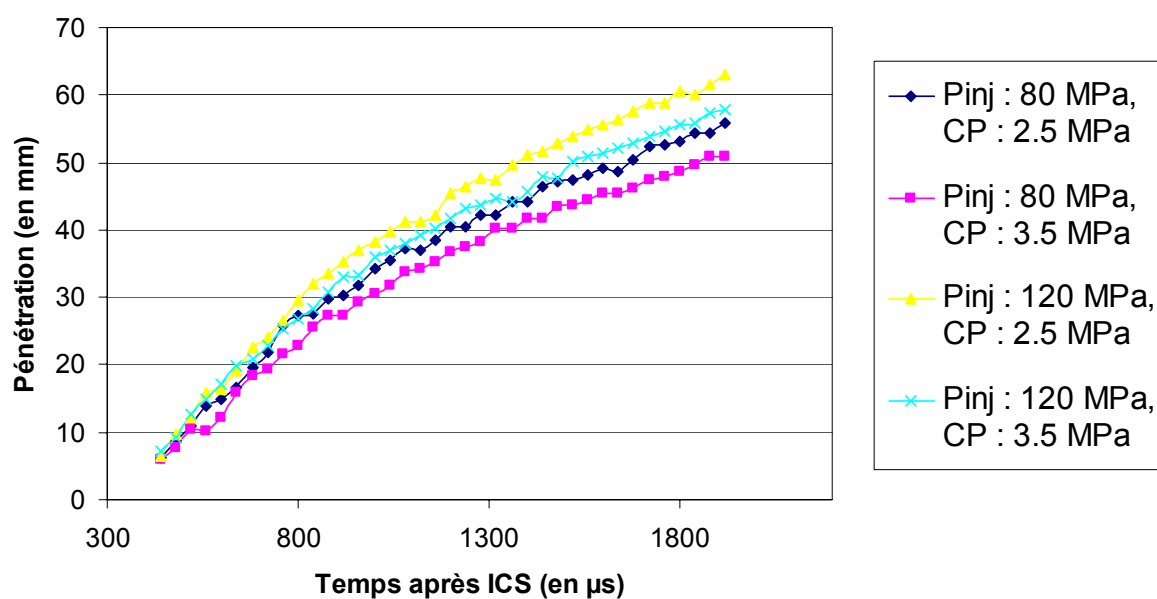


Figure 5-18 : Evolution de la pénétration du jet 1 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.

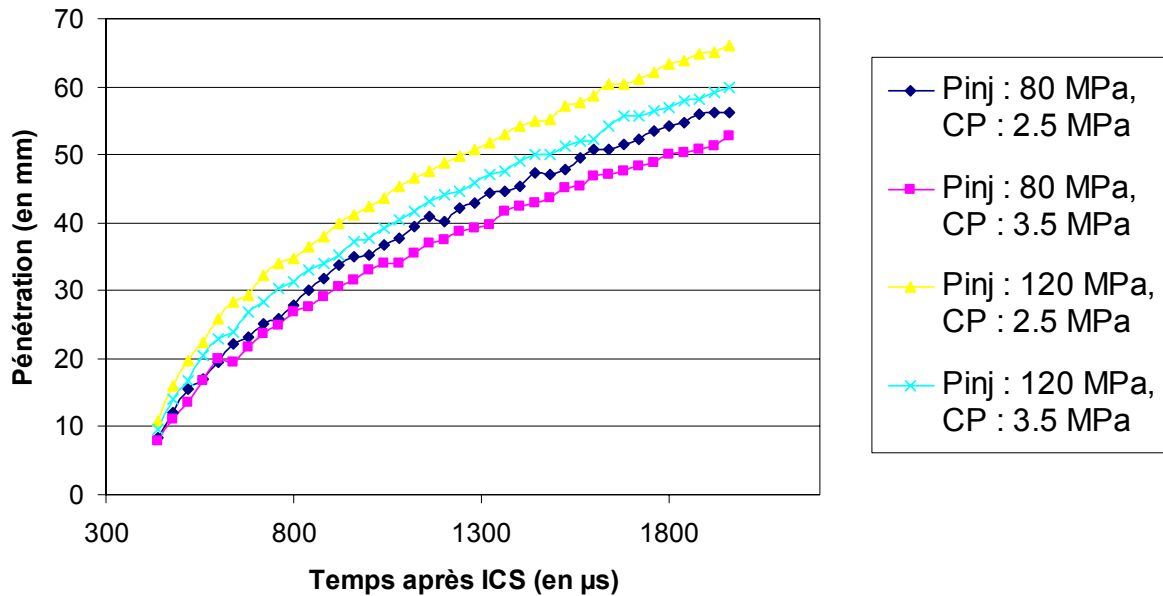


Figure 5-19 : Evolution de la pénétration du jet 3 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.

Conformément aux prévisions, on peut constater dans les deux cas, que la pénétration, à contre pression fixée augmente avec la pression d'injection et qu'à pression d'injection fixée, elle augmente quand la contre pression diminue.

Il est à noter, et ceci est très flagrant pour l'injecteur 2, que l'évolution de la pénétration à 80 MPa pour une contre pression de 2.5 MPa se superpose à la pénétration obtenue à 120 MPa pour une contre pression de 3.5 MPa. Pour l'injecteur 1 le phénomène est moins marqué mais les pénétrations se suivent de près. Par conséquent, on pourrait supposer que travailler à une pression de 120 MPa avec une contre pression de 3.5 MPa revient au même que de travailler à 80 MPa avec une contre pression de 2.5 MPa.

La Figure 5-17 représente l'évolution de la pénétration du jet 5 de l'injecteur 1, on peut s'apercevoir que les courbes n'ont pas le même comportement que pour les autres jets. Notamment la courbe Pinj 120 MPa, CP 3.5 MPa ne se superpose pas à la courbe Pinj 80 MPa, CP 2.5 MPa. Le jet 5 de l'injecteur 1 a un comportement différent des autres.

Angle d'ouverture :

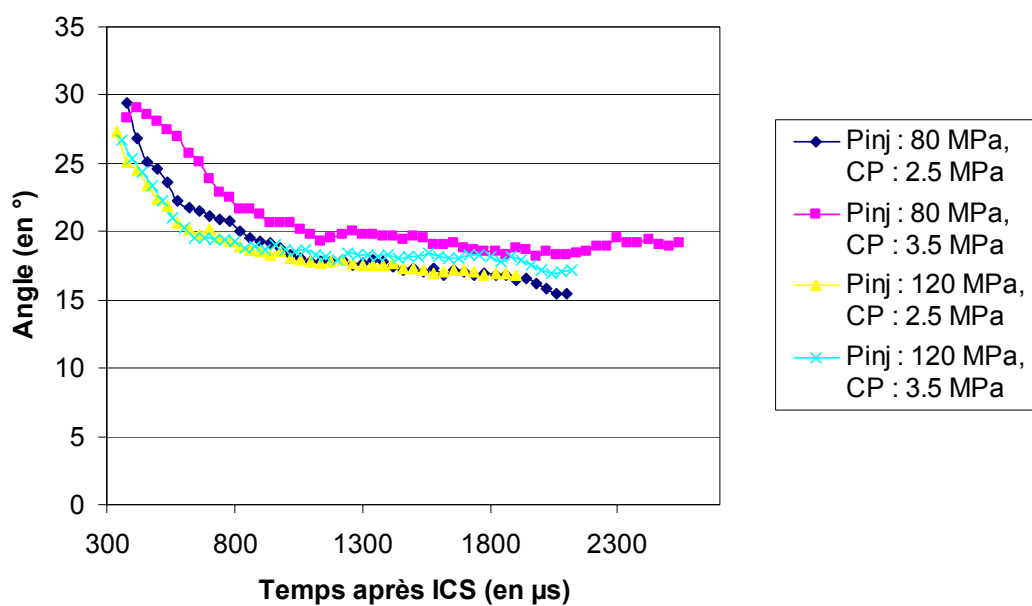


Figure 5-20 : Evolution de l'angle du jet 2 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.

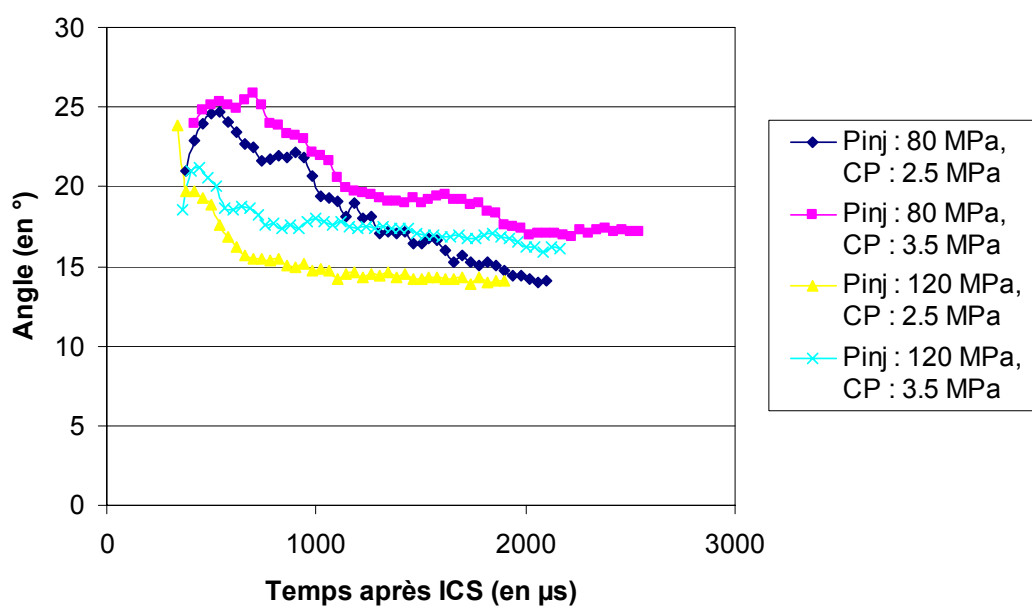


Figure 5-21 : Evolution de l'angle du jet 5 (injecteur 1) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.

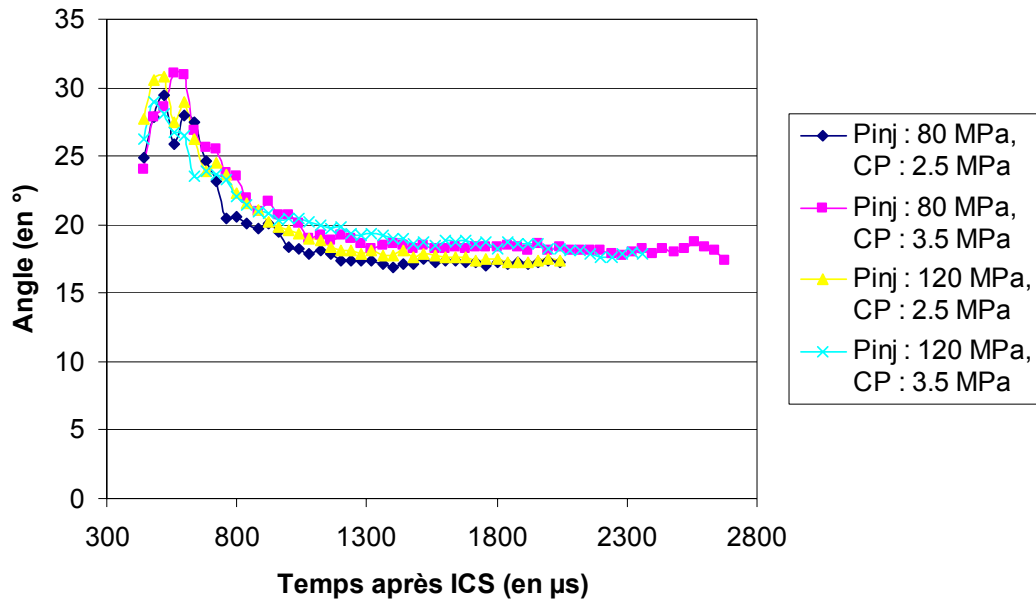


Figure 5-22 : Evolution de l'angle du jet 1 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pression.

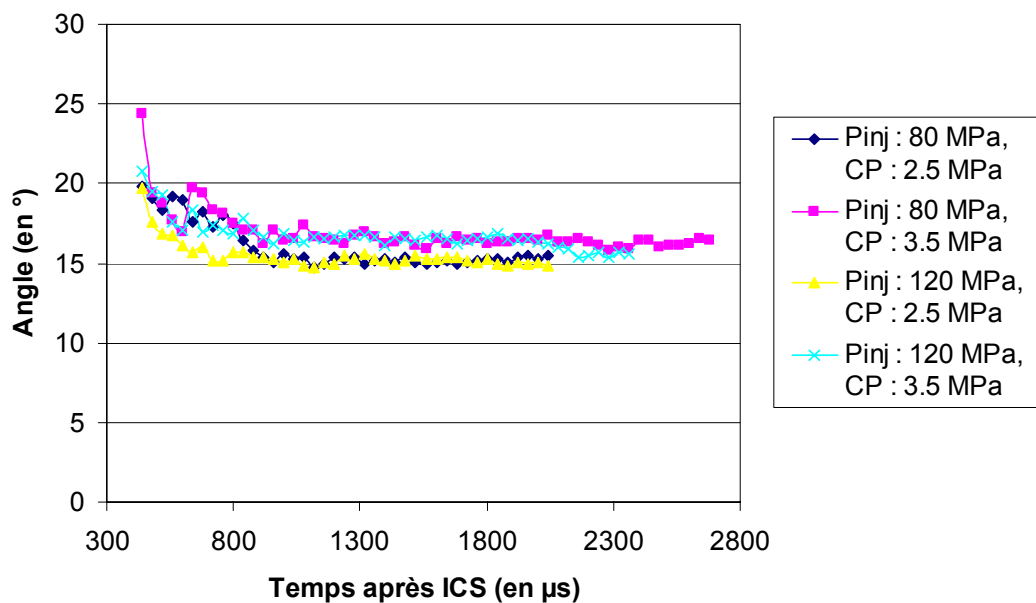


Figure 5-23 : Evolution de l'angle due jet 3 (injecteur 2) pour différentes pressions d'injection et contre pressions.

On constate que pour l'injecteur 2, il y a très peu de différence entre les angles obtenus à différentes pressions d'injection et de contre pression. Par contre la différence est très importante pour les angles de l'injecteur 1. Une des explications pour ces différences est le fait que pour l'injecteur 1, les trous d'injection n'ont pas le même angle par rapport à l'axe de l'injecteur et donc au plan image. Ceci peut entraîner des erreurs de mesures par rapport à l'injecteur 2 où tous les trous ont le même angle.

Comme pour la pénétration, la comparaison des angles à différentes pression d'injection et contre pression pour le jet 5 de l'injecteur 1 (Figure 5-21) montre que ce jet à un comportement différent des autres.

Evolution de la richesse

La richesse obtenue est une richesse globale.

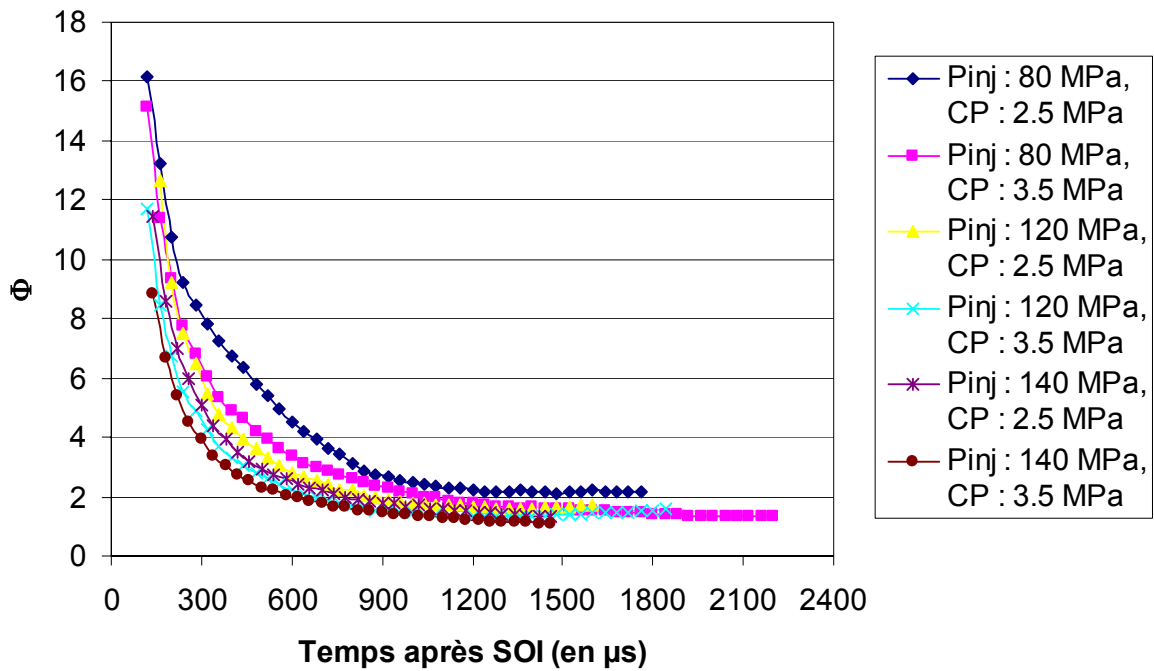


Figure 5-24 : Evolution de la richesse pour l'injecteur 1 à différentes pressions d'injection et contre pressions.

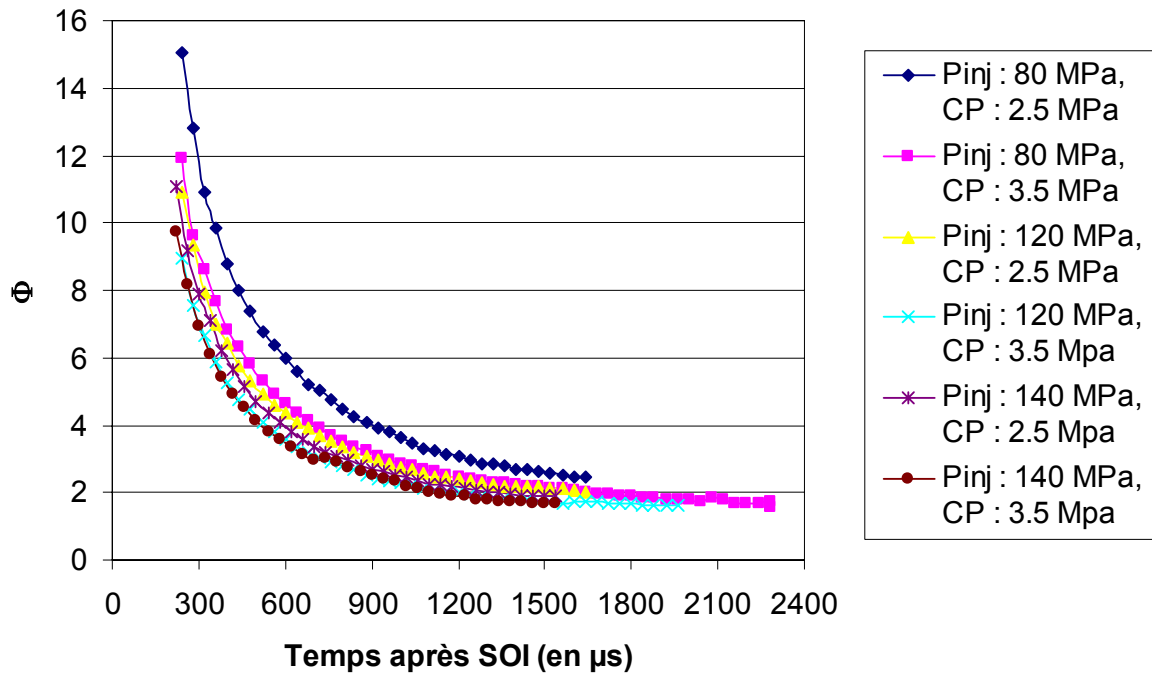


Figure 5-25 : Evolution de la richesse pour l'injecteur 2 à différentes pressions d'injection et contre pressions.

La richesse est représentée à partir du SOI et non plus de l'ICS comme pour les autres paramètres. Le SOI est l'instant où la première goutte de liquide apparaît en sortie du trou d'injection. Nous avons choisi cet instant de départ pour plus de facilité de comparaison des mesures.

On constate, pour les deux injecteurs que la richesse du mélange diminue avec la contre pression mais également avec la pression d'injection. La richesse à 80 MPa pour une contre pression de 2.5 MPa est plus grande que la richesse à 140 MPa pour la même contre pression. Ceci peut s'expliquer par le fait que la vitesse des gouttelettes à 140 MPa est plus grande qu'à 80 MPa, un phénomène d'aspiration se produit à l'intérieur du jet.

Au cours de l'injection, le volume des jets augmente. De plus Arbeau et *al.*, 2004, a montré que l'entraînement d'air à l'intérieur du jet augmente avec la pression, donc plus d'air est entraîné dans le jet d'où une richesse plus faible pour des haute pression d'injection que pour des faible pression d'injection.

5.1.3. Les lois empiriques pour la pénétration et l'angle du jet

Dans un premier temps, nous allons comparer nos mesures aux prédictions de la littérature à savoir Dent et Hiroyasu (Chapitre 2, Paragraphe 2.1.3). Puis nous proposerons des

modifications de ces lois qui seront alors valables pour les injecteurs multi trou à haute pression d'injection.

5.1.3.1. Les lois empiriques connues

Nous allons confronter nos mesures aux lois empiriques établies par Dent et Hiroyasu en ce qui concerne la pénétration et Hiroyasu et Reitz - Bracco pour l'évolution de l'angle.

Plusieurs expérimentations et travaux théoriques ont été réalisés sur les sprays diesel. La plupart ont toujours pour conclusion une loi empirique ou semi-empirique pour prédire l'évolution de la pénétration et de l'angle du spray au cours de l'injection comme une fonction de plusieurs paramètres. Les résultats expérimentaux de ces travaux sont assez divers et parfois contradictoires (Hay et Jones, 1972).

Les différentes lois de pénétration

Les différentes lois de pénétration ont été exposées au Chapitre 2, Paragraphe 2.1.3. Nous allons comparer dans un premier temps, nos résultats aux lois de Dent (équation (2.2)) et Hiroyasu (équation (2.4) et (2.5))

Les Figure 5-26 et Figure 5-27 représentent l'évolution de la pénétration pour un injecteur 2 comparer avec les prédictions d'Hiroyasu et de Dent.

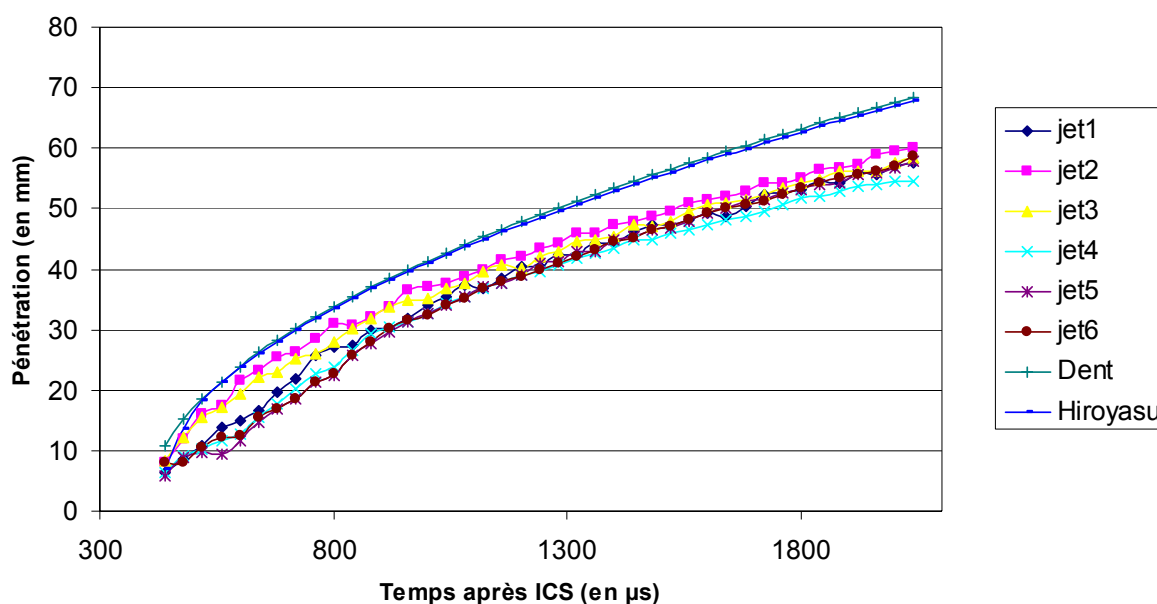


Figure 5-26 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu et Dent pour un injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).

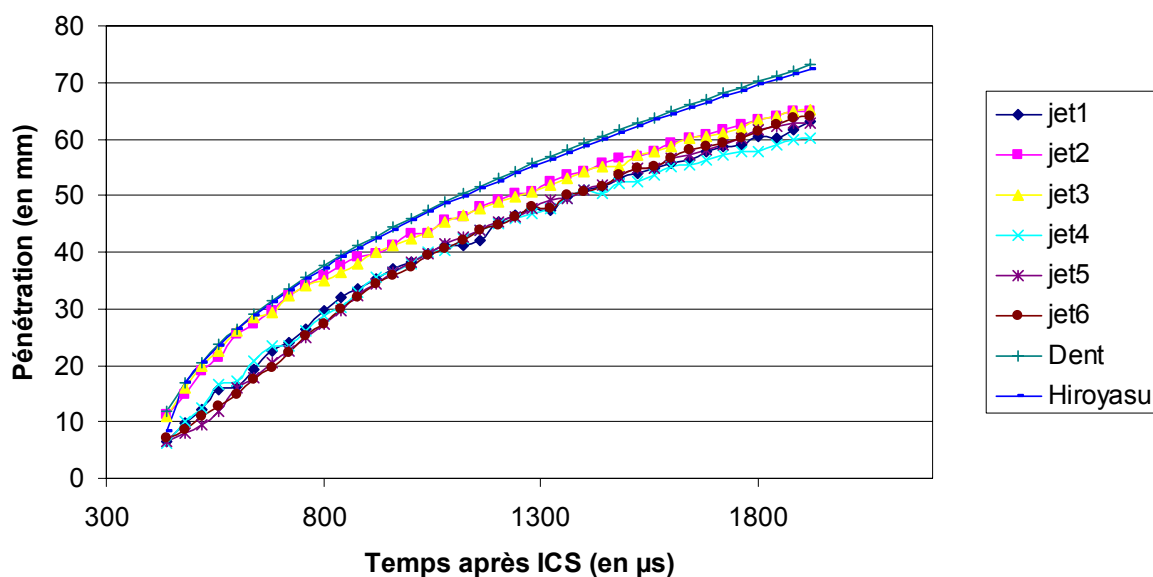


Figure 5-27 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu et Dent pour un injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).

On peut s'apercevoir que ces deux lois surestiment la pénétration des jets issus de l'injecteur 2 que ce soit pour une pression d'injection de 80 MPa ou 120 MPa. Nous verrons un peu plus loin dans le cours de cette étude comment modifier la loi d'Hiroyasu pour qu'elle suive correctement la pénétration des jets en reprenant les lois physiques qui ont conduit Hiroyasu et Arai à l'établissement de cette dernière.

Les différentes lois d'angle

Des lois empiriques ont également été mises en place pour décrire l'évolution de l'angle du cône au cours du temps (Chapitre 2, Paragraphe 2.1.3). Nous comparerons nos mesures aux prédictions de Hiroyasu et Arai (équation (2.9)) et de Reitz et Bracco (équation (2.11)).

La communauté s'accorde à dire que l'angle du spray ne dépend pas de la pression d'injection mais des propriétés physiques de l'huile et du milieu et de la géométrie de l'injecteur.

Le Tableau 5-2 donne la valeur des angles pour différentes valeurs de contre pression et pour les 2 injecteurs.

	Hiroyasu et Arai		Reitz et Bracco	
CP (en MPa)	2.5	3.5	2.5	3.5
Injecteur 1	15.7°	17.5°	14.1°	16.6°
Injecteur 2	15.9°	17.7°	14.1°	16.6°

Tableau 5-2 : Prédiction de l'angle par Hiroyasu et Reitz (température gaz 60°C).

Les 4 graphiques suivants représentent l'évolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Figure 5-28 et Figure 5-29) et pour l'injecteur 2 (Figure 5-30 et Figure 5-31) comparée aux prédictions d'Hiroyasu et Arai, et de Reitz et Bracco

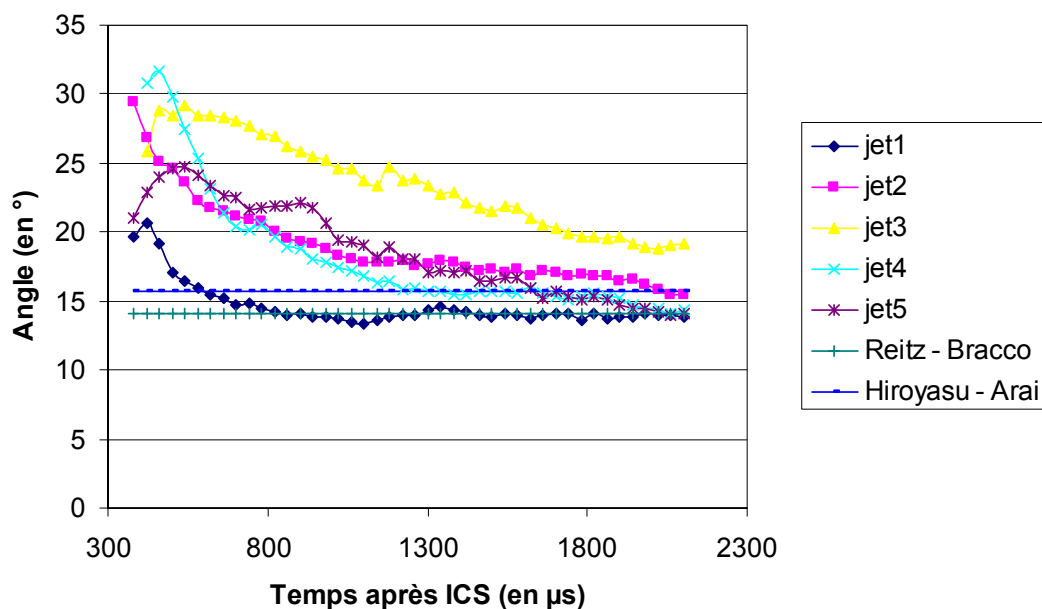


Figure 5-28 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 1 (P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).

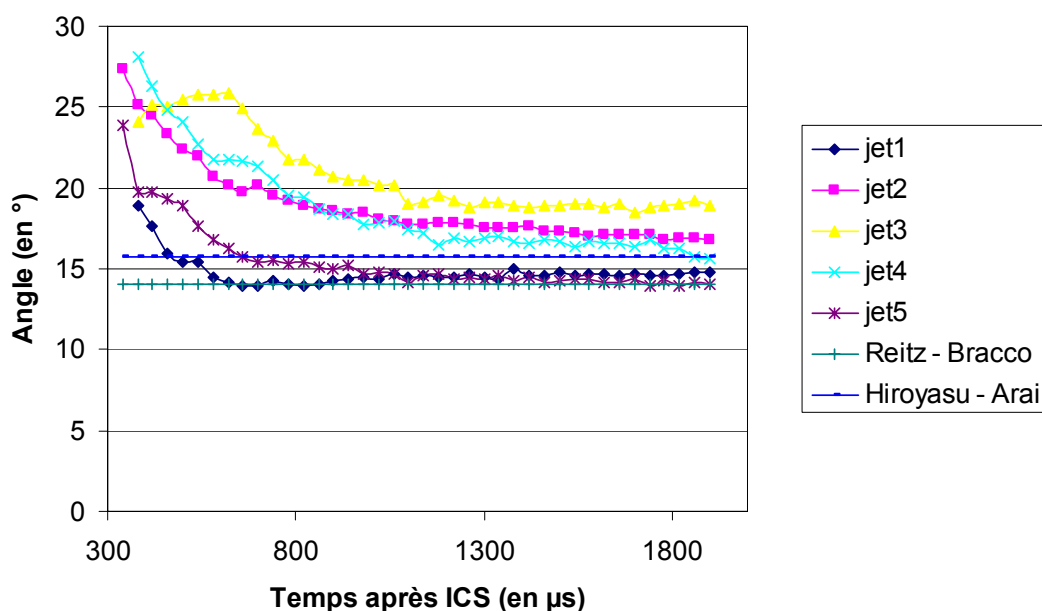


Figure 5-29 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 1 (P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).

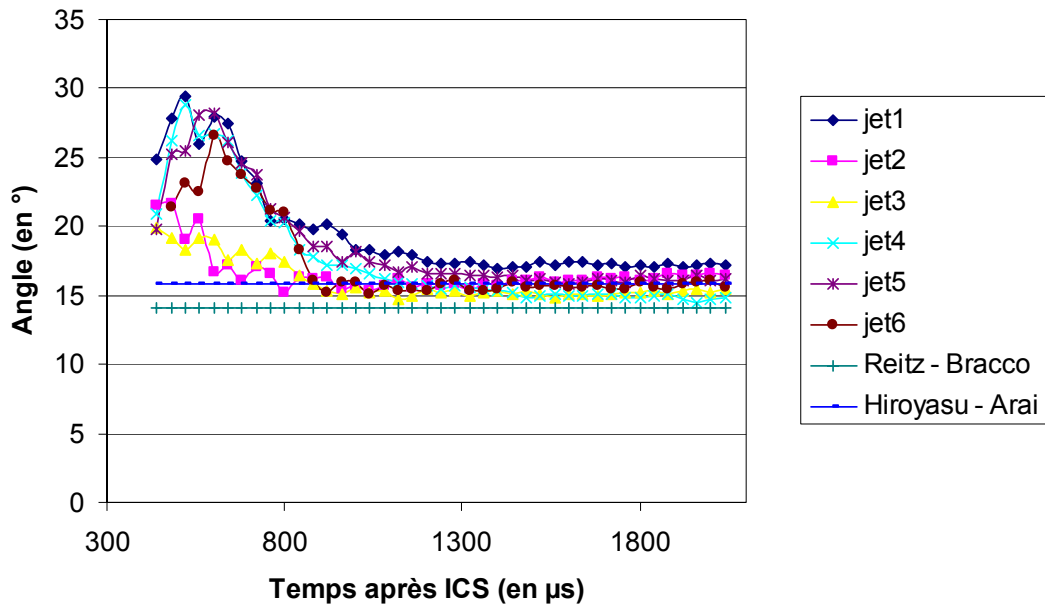


Figure 5-30 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).

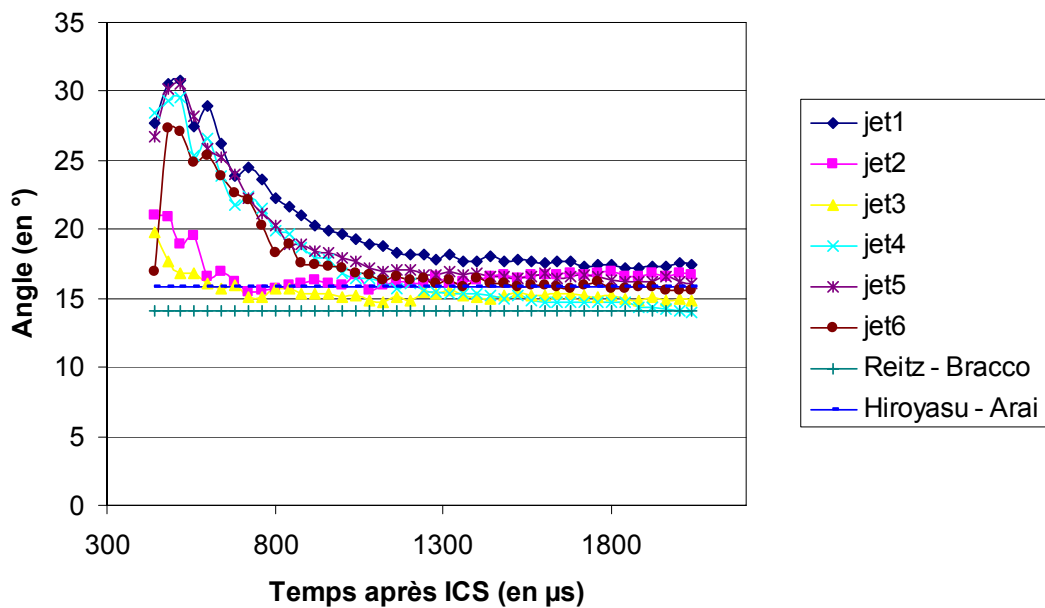


Figure 5-31 : Comparaison angle réel et prédiction par Hiroyasu et Arai, et Reitz et Bracco pour un injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).

Comme on peut le remarquer, quel que soit le type d'injecteur, la prédiction de l'angle donnée par la relation de Hiroyasu et Arai correspond à une très bonne approximation de l'angle constant du jet. Par contre, la prédiction de Reitz et Bracco sous-estime l'angle.

Dans notre étude on considéra que la prédiction de l'angle d'Hiroyasu est une très bonne prédiction de l'angle du jet à haute pression.

5.1.3.2. Modification de la loi de pénétration de Hiroyasu

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu que la prédiction de la pénétration par Hiroyasu sur estime nos mesures. Nous allons voir comment modifier la loi de Hiroyasu pour l'adapter à nos mesures.

Théorie

Tout part des hypothèses de Levich, 1962. Il a exprimé la longueur de break up d'un jet liquide à grande vitesse avec les hypothèses suivantes :

- Le jet liquide de densité ρ_l se déplace dans un milieu gazeux de densité ρ_g .
- La vitesse relative entre le jet liquide et le milieu gazeux est grande.
- Quand l'amplitude du jet augmente, le jet tend à devenir instable et finalement le jet peut s'éclater en gouttelettes.

La longueur de break up du jet $l_{breakup}$ est donnée par :

$$l_{breakup} \approx u_{breakup} t_{breakup} \approx \alpha_c \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} d_{inj} \quad (4.1)$$

Si la pression en amont de l'injecteur peut être estimée ou mesurée et en supposant que l'écoulement à travers le nez est quasiment constant, incompressible et uni dimensionnel, la masse injectée à travers le nez \dot{m}_i est donnée par (Heywood, 1988) :

$$\dot{m}_i = C_d A_n \sqrt{2 \rho_l \Delta P_l} \quad (4.2)$$

Avec A_n la surface du trou d'injection.

Comme $\dot{m}_i = \rho_l A_n u_i$, la vitesse du fluide u_i peut être exprimée en utilisant (4.2) par la relation suivante :

$$u_i = C_d \left(\frac{2 \Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0.5} \quad (4.3)$$

En supposant que la vitesse du jet dans le corps liquide u_b est égale à la vitesse initiale du jet u_i , l'instant de break up peut être exprimé à l'aide des équation (4.1) et (4.3) par :

$$t_{breakup} = \frac{\alpha_c \rho_l d_{inj}}{\sqrt{2 C_d^2 \rho_g \Delta P_l}} \quad (4.4)$$

Connaissant le coefficient de décharge, la pénétration du spray avant le break up est donnée directement à partir de la relation (4.3):

$$S = C_d \left(\frac{2\Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0.5} t \quad (4.5)$$

En s'appuyant sur la théorie des jets continus, la longueur de pénétration après le break up est supposée proportionnelle à $t^{1/2}$:

$$S = \beta \sqrt{t} \quad (4.6)$$

L'expression de β peut être obtenue à partir de la condition : $S = l_{breakup}$ à $t = t_{breakup}$

$$\beta = 2^{0.25} (\alpha C_d d_{inj})^{0.5} \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25} \quad (4.7)$$

Hiroyasu et Arai ont déterminé les constantes de l'équation (4.14) à partir de données expérimentales et ont trouvé $\alpha_c = 15.8$ et $C_d = 0.39$. Soit la loi de pénétration après le break up :

$$S = 2,95 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_{inj} t)^{0.5}$$

Depuis Hiroyasu et Arai les pressions d'injection ont considérablement augmenté (rapport 3 ou 4). Dans le but d'adapter cette loi aux nouveaux types d'injecteurs, il faut retrouver les paramètres α_c et C_d , à partir de nos mesures.

Le coefficient de l'équation (4.13) est le produit d'un coefficient numérique K par un facteur constant Cst représentant les conditions d'injection :

$$\beta = KCst$$

$$\text{Avec : } K = 2^{0.25} (\alpha_c C_d)^{0.5} \text{ et } Cst = d_{inj}^{0.5} \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25}$$

En se plaçant après le temps de break up estimé par la loi de Hiroyasu, $t_{breakup}$, aux alentours de 100 μs après la sortie de la première goutte, nous prendrons 150 μs , nous avons avec nos données expérimentales regarder l'évolution du rapport $K = S / (Cst \sqrt{t})$ (4.8)

Pour la détermination du coefficient K, nous avons utilisé les mesures de pénétrations réalisées sur les deux injecteurs. Connaissant la pénétration de chaque jet (soit 5 pour l'injecteur 1 et 6 pour l'injecteur 2), il est aisé de déterminer le coefficient K à partir de l'équation (4.8). Ce coefficient a été obtenu en réalisant la moyenne des valeurs de K pour 3

pressions d'injection (80, 120 et 160 MPa) et 2 contre pressions (2.5 et 3.5 MPa) et ceux pour les deux injecteurs utilisés (Injecteur 1 et 2) et un échantillonnage de 35 points ce qui représente 1050 mesures pour l'injecteur 1 et 1260 pour l'injecteur soit un total de 2310 mesures.

Pour les deux types d'injecteurs utilisés, nous avons trouvé $K = 2.59$.

Donc, après l'instant de break up, on peut en conclure que

$$S = K \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_{inj} t)^{0.5} \quad (4.9)$$

Pour obtenir l'instant de break up et l'évolution de la pénétration avant cet instant, il est nécessaire de connaître α_c .

Connaissant C_d , il est possible d'obtenir α_c par la relation suivante :

$$\alpha_c = \frac{K^2}{2^{0.5} C_d} \quad (4.10)$$

Les coefficients de décharge mesurés pour les deux injecteurs sont : 0.55 pour l'injecteur 1 et 0.64 pour l'injecteur 2, soit respectivement $\alpha_c = 8.62$ et $\alpha_c = 7.41$.

Nouvelle loi de pénétration :

Pour l'injecteur 1 :

Pour $t < t_{break}$:

$$S = 0,5 \left(\frac{2\Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0.5} t \quad (2)$$

Pour $t > t_{break}$:

$$S = 2,59 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_{inj} t)^{0.5} \quad (3)$$

$$\text{Avec } t_{break} = 13 \rho_l d_{inj} (\rho_g \Delta P_l)^{-0.5}$$

Pour l'injecteur 2 :

Pour $t < t_{break}$:

$$S = 0,58 \left(\frac{2\Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0.5} t \quad (2)$$

Pour $t > t_{break}$:

$$S = 2,59 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_{inj} t)^{0.5} \quad (3)$$

$$\text{Avec } t_{break} = 9.66 \rho_l d_{inj} (\rho_g \Delta P_l)^{-0.5}$$

Résultats

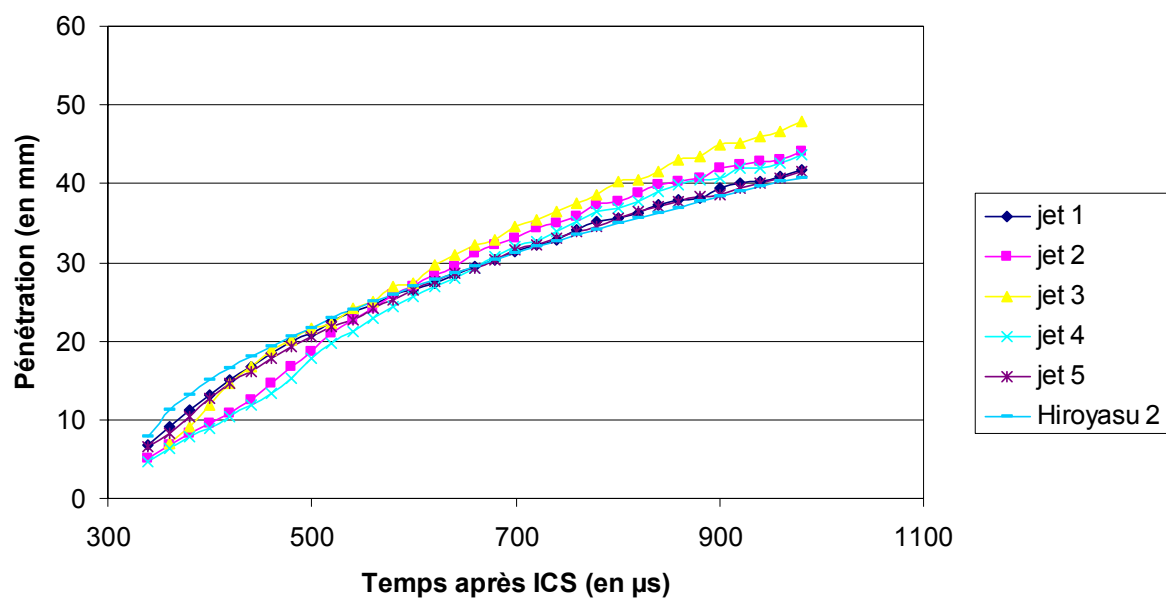


Figure 5-32 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu modifiée pour l'injecteur 1 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).

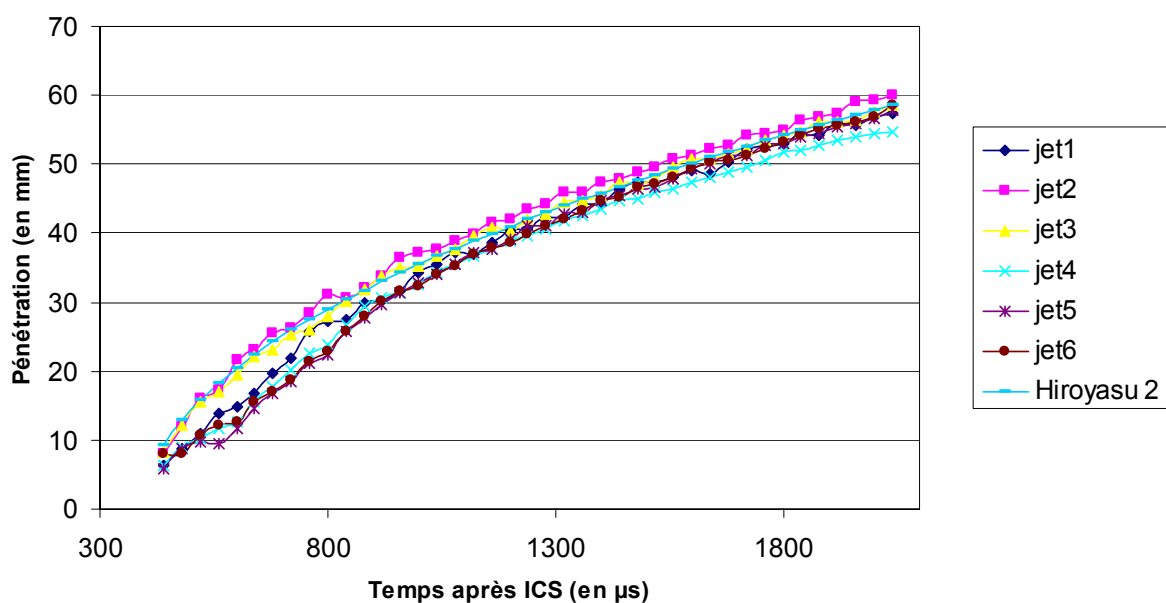


Figure 5-33 : Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu modifiée pour l'injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).

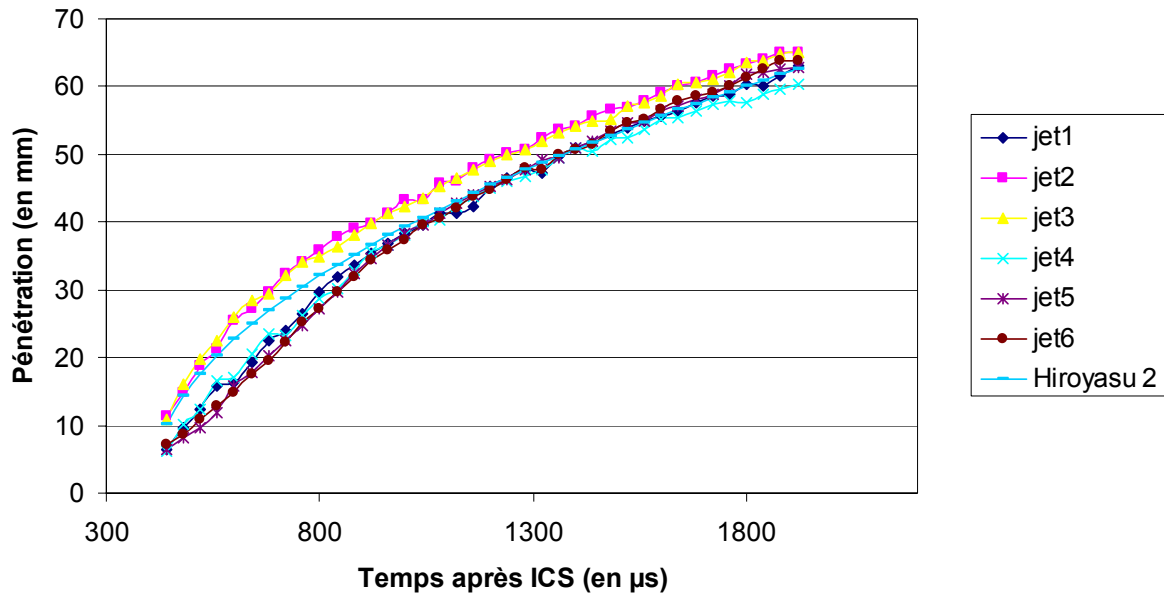


Figure 5-34: Comparaison pénétration réelle et prédiction par Hiroyasu modifiée pour l'injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).

La loi obtenue pour la pénétration permet de prédire de façon très fiable la pénétration des sprays pour les deux types d'injecteur et pour n'importe quelles pressions d'injection et contre pressions. D'autres résultats pour des pressions d'injection de 80, 120, 140 et 160 MPa et des contre pressions de 2.5, 3.5 et 5 MPa peuvent être trouvés en annexe 11.

5.1.4. Etude des écarts type

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'étude des écarts type sur les paramètres morphologiques des sprays (pénétration et angle). Dans une première partie, nous allons définir la notion d'écart type puis nous verrons les différences entre les deux types d'injecteurs utilisés.

5.1.4.1. Définition de l'écart type

L'espérance $E(x)$ caractérise la valeur de la variable aléatoire autour de laquelle on a « le plus de chance » de trouver cette variable.

$$\mu = E(x) = \sum_i p_i x_i$$

L'écart type $\sigma(x)$ caractérise l'étendue de l'intervalle autour de $E(x)$ à l'intérieur duquel on a une « grande chance » de trouver la variable aléatoire ; l'écart type $\sigma(x)$ est appelé « caractéristique de dispersion ».

$V(x) = \sigma^2(x)$ est appelé variance.

$$V(x) = \frac{\sum_i^n (x_i - \mu)^2}{n-1} \text{ et } \sigma(x) = \sqrt{V(x)}$$

Par conséquent, l'étude de l'évolution de l'écart type peut nous renseigner sur la stabilité de l'injection et des mesures réalisées.

5.1.4.2. Représentation

La représentation avec les écarts type ne peut être obtenue qu'en réalisant les mesures sur l'ensemble des images et non sur les images moyennes.

Nous allons présenter pour plus de facilité de lecture l'évolution de la moyenne et des écarts type au cours du temps pour deux jets seulement (les jet 4 et 5 de chaque injecteur). Nous étudierons deux pressions d'injection 80 et 120 MPa pour une contre pression de 2.5 MPa.

Pénétration

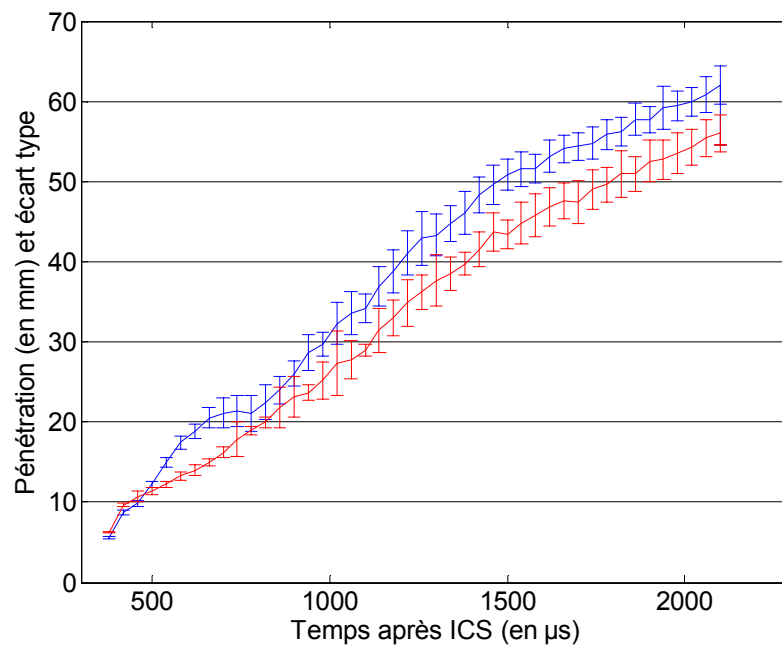


Figure 5-35 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 1, Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.

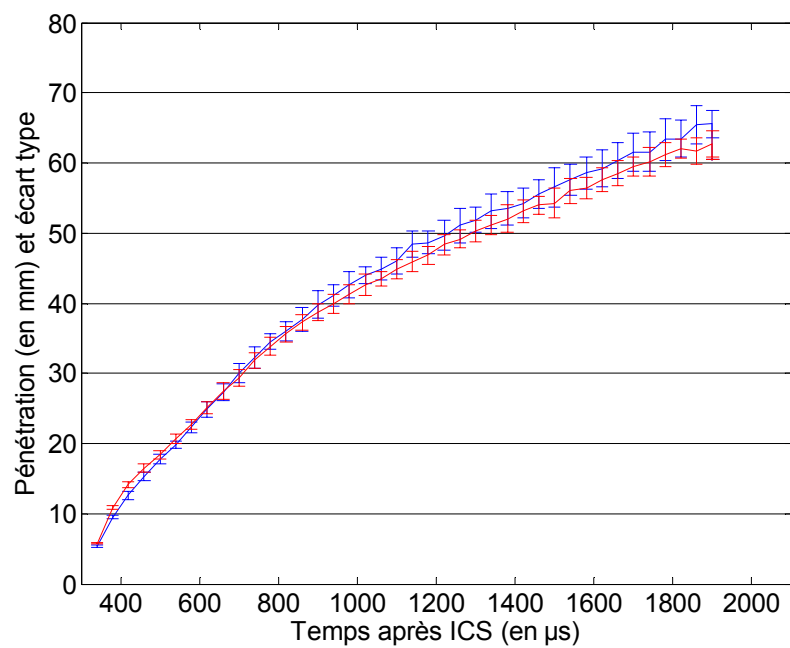


Figure 5-36 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 1, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.

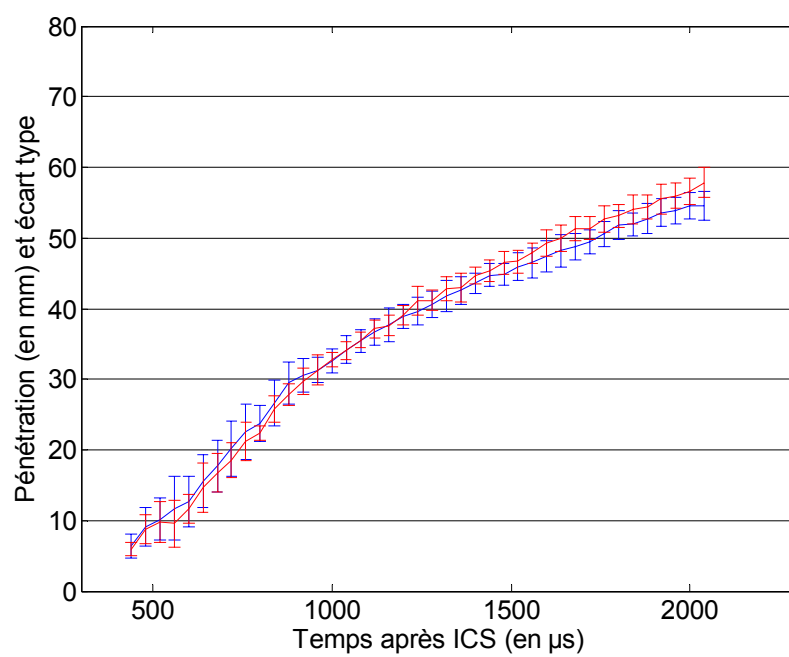


Figure 5-37 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.

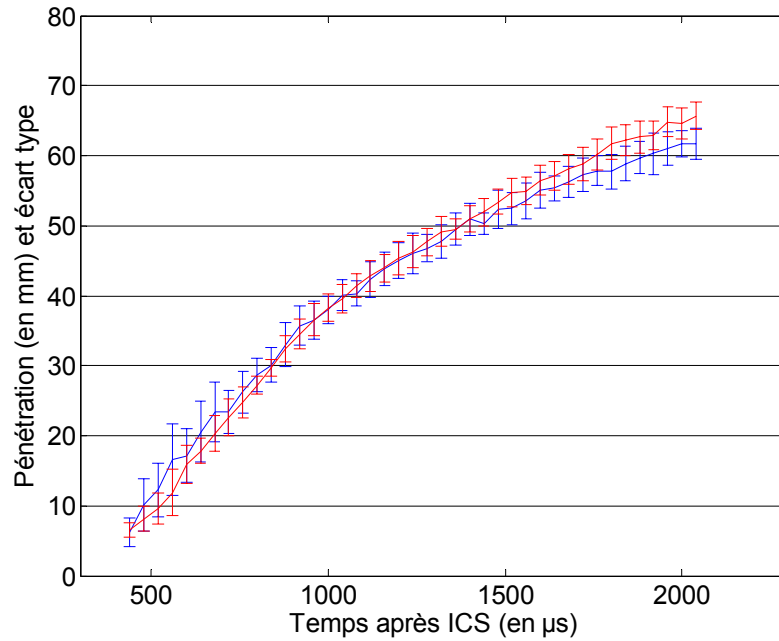


Figure 5-38 : Pénétration moyenne et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.

L'étude de l'écart type sur la pénétration montre une différence considérable entre les deux types d'injecteurs. En effet, pour l'injecteur 1, l'écart type augmente au cours de l'injection ce qui semble logique, les fluctuations autour de la valeur moyenne sont plus grandes en fin d'injection. Par contre pour l'injecteur 2, l'écart type augmente très fortement au début de l'injection puis diminue pour devenir dans les mêmes proportions que celles de l'injecteur 1. Les trois images suivantes (Figure 5-39) ont été prises au même instant dans l'injection pour l'injecteur 2 et on peut noter que les mêmes jets ont des comportements complètement différents.

L'étude de l'écart type peut donc amener une information supplémentaire concernant l'évolution de l'injection.

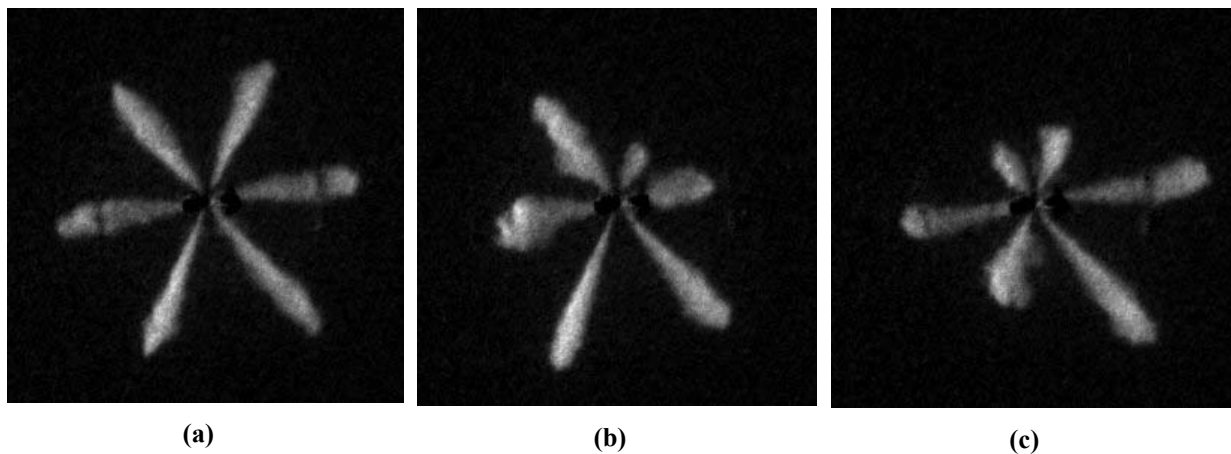


Figure 5-39 : Image d'injection (injecteur 2) prise au même instant après SOI pour trois injections successives.

Pour expliquer ces différences entre les jets au même instant de l'injection, on peut penser que le positionnement de l'aiguille devant les trous est différent d'un essai à un autre. Pourtant, l'injecteur 2 est un injecteur à aiguille doublement guidée, donc normalement l'aiguille devrait être positionnée correctement. Une instabilité existe pour cet injecteur au début de l'injection.

Angle

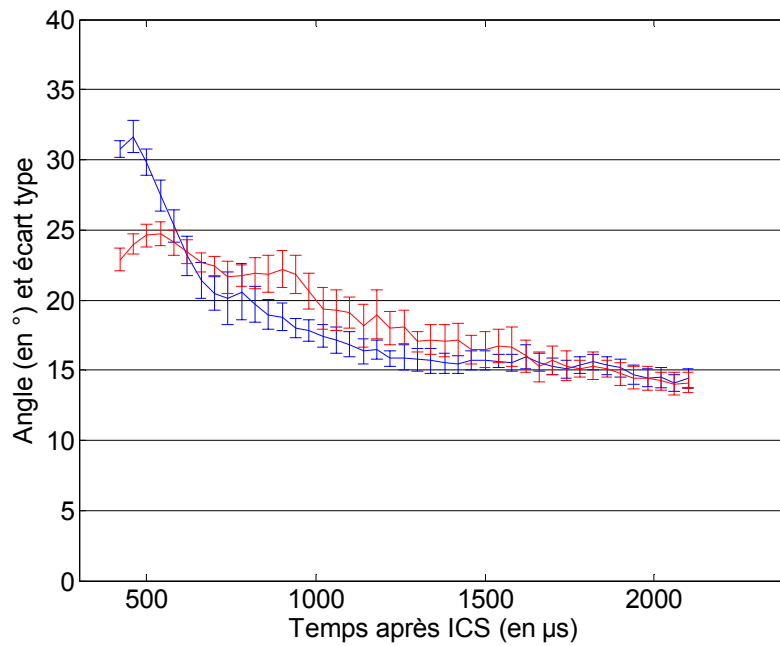


Figure 5-40 : Angle moyen et écart type, injecteur 1, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.

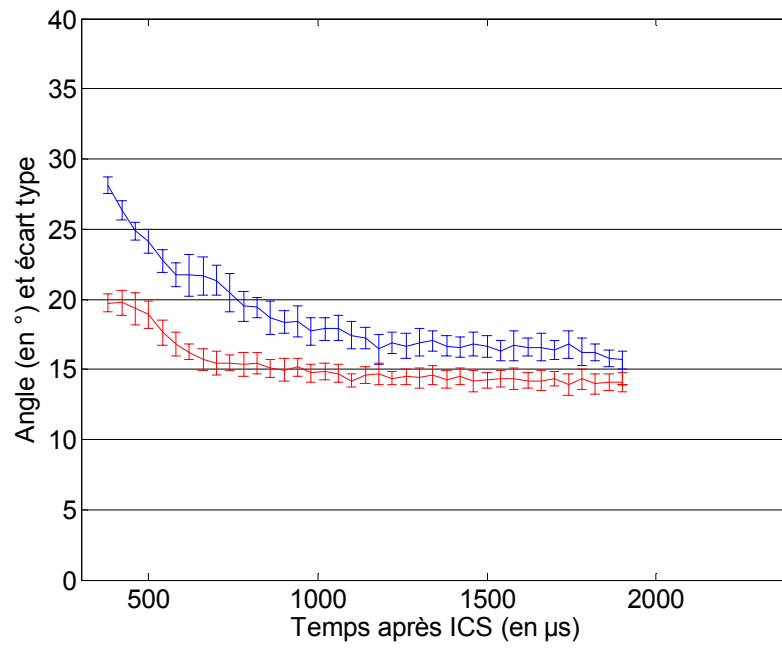


Figure 5-41 : Angle moyen et écart type, injecteur 1, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.

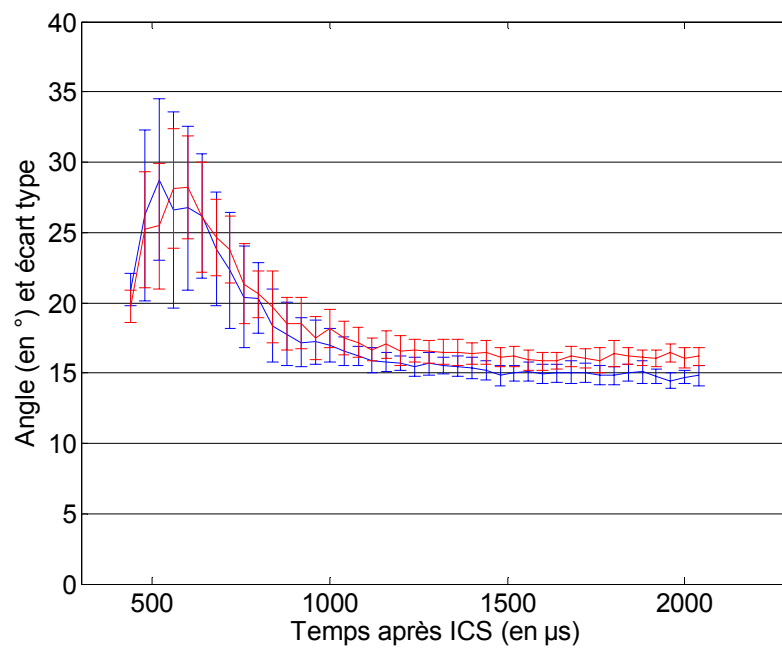


Figure 5-42 : Angle moyen et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa.

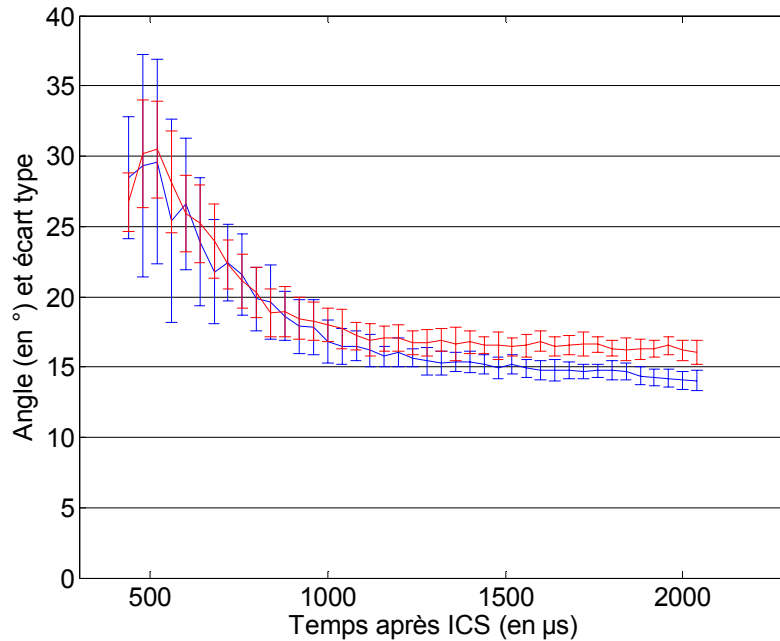


Figure 5-43 : Angle moyen et écart type, injecteur 2, P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa.

Comme dans le cas de l'étude de l'écart type pour la pénétration, on peut s'apercevoir que dans le cas de l'injecteur 2, l'écart type est très grand puis quand l'angle tend vers une valeur constante l'écart type diminue et se stabilise. Par contre dans le cas de l'injecteur 1, au début de l'injection, l'écart type est peu important, puis augmente de manière progressive au cours de l'injection (instabilité plus grande en fin d'injection).

Comme nous l'avons dit l'écart type permet de nous renseigner sur la stabilité de l'injection. On peut donc s'apercevoir que l'injecteur bien qu'ayant une pénétration moyenne et des angles de jets similaires, l'écart type est très grand au début de l'injection ce qui veut dire que l'injection est instable au début de l'injection, ce qui peut entraîner une mauvaise répartition du carburant au début de l'injection, période primordiale pour une bonne combustion.

Par conséquent pour la qualification d'un injecteur, il semble nécessaire d'avoir une connaissance de l'écart type en plus des valeurs moyennes des paramètres morphologiques.

5.1.5. Etude d'une multi injection

Nous sommes également intéressés à la réalisation de mesure sur une multi injection. Ici deux injections ont été réalisées, un pré injection suivie d'une injection principale. Nous présenterons les résultats concernant la pénétration et l'angle. Nous montrons la faisabilité de la mesure, mais ne ferons pas d'étude complète.

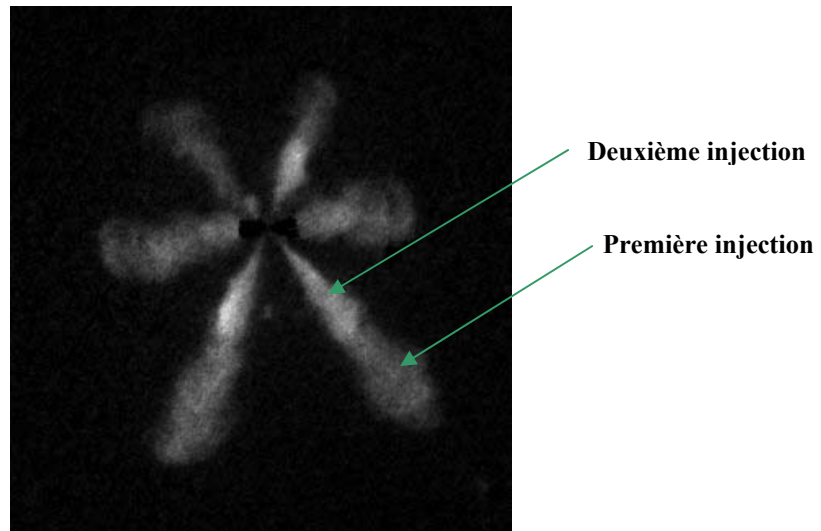


Figure 5-44 : Visualisation d'une multi injection.

Pour cette expérimentation, nous avons utilisé l'injecteur 2. La pression d'injection est de 100 MPa et la contre pression est de 3.5 MPa.

Les paramètres d'injection sont les suivants :

Pulse	Début (en μs)	Durée (en μs)
1	1000	350
2	1600	1100

Tableau 5-3 : Paramètres d'injection.

Pénétration

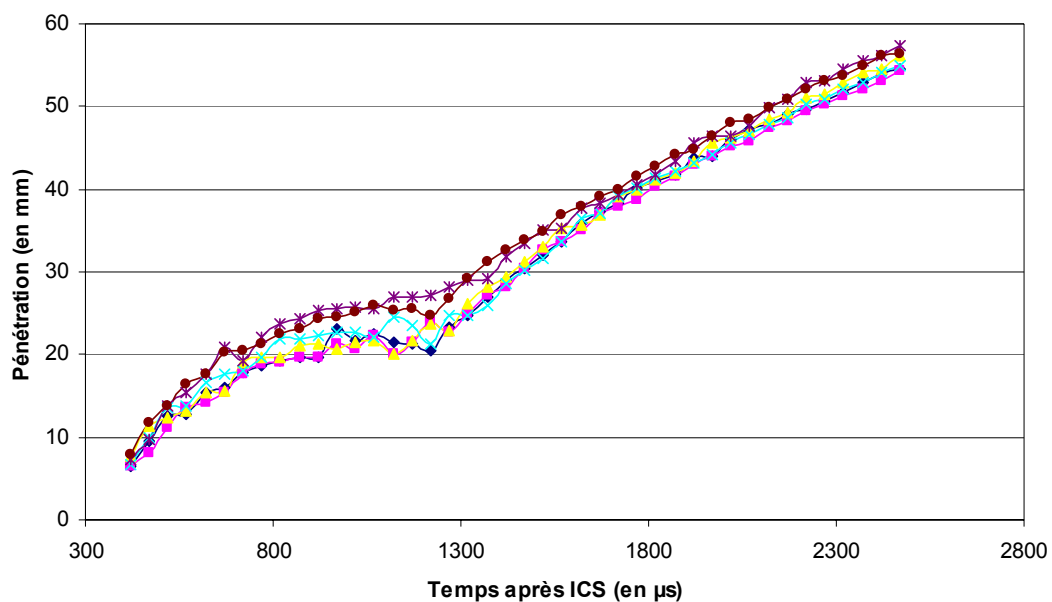


Figure 5-45 : Evolution de la pénétration pour la multi injection.

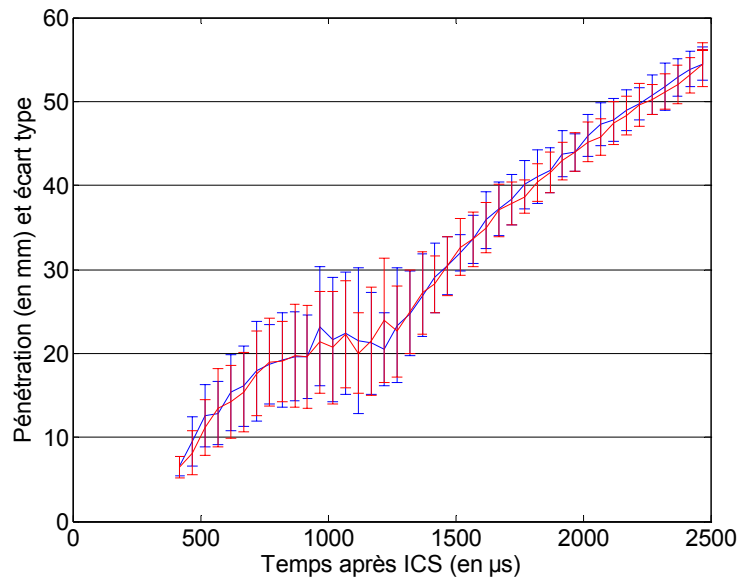


Figure 5-46 : Evolution de la pénétration moyenne et de l'écart type pour la multi injection.

L'évolution de la pénétration des jets montre que 1250 μ s après l'ICS, l'injection principale rattrape la pré-injection. Les écarts types sur la pré-injection sont relativement importants.

Angle

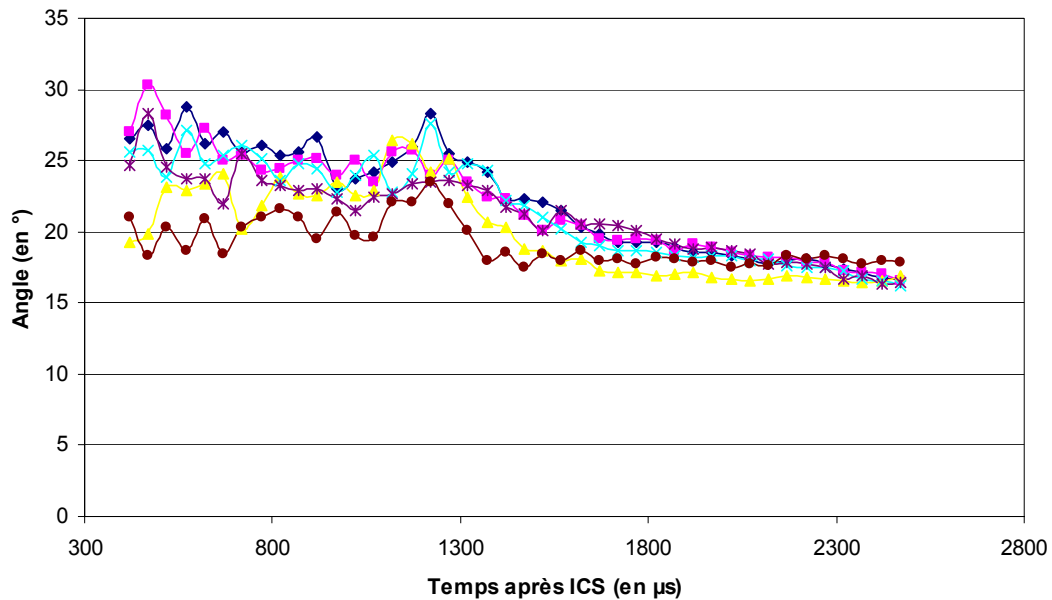


Figure 5-47 : Evolution de l'angle moyen pour la multi injection.

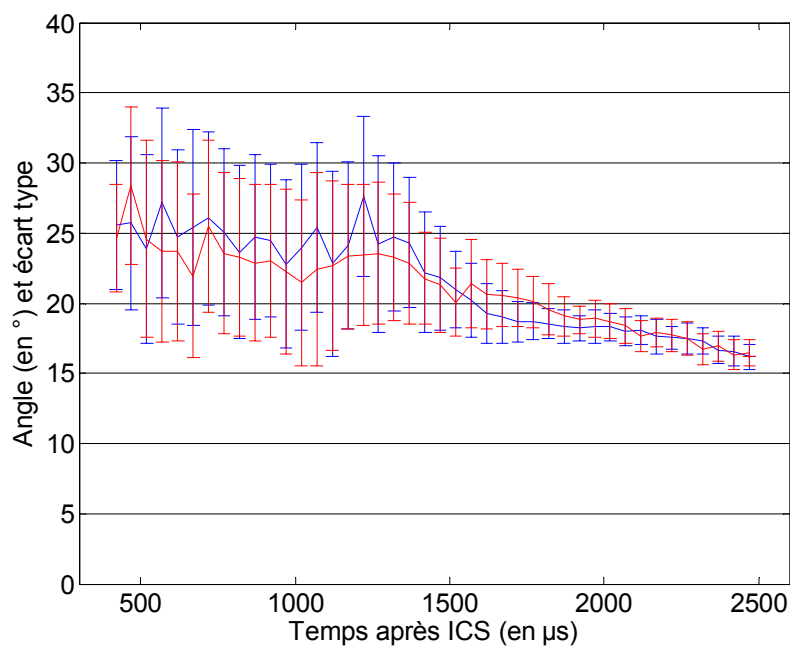


Figure 5-48 : Evolution de l'angle moyen et de l'écart type pour la multi injection.

L'utilisation d'une pré injection semble stabiliser l'angle. Durant la pré-injection, l'angle est relativement constant puis ensuite diminue légèrement avec l'injection principale. Par contre les écarts type sont très importants pour la pré injection.

Volume

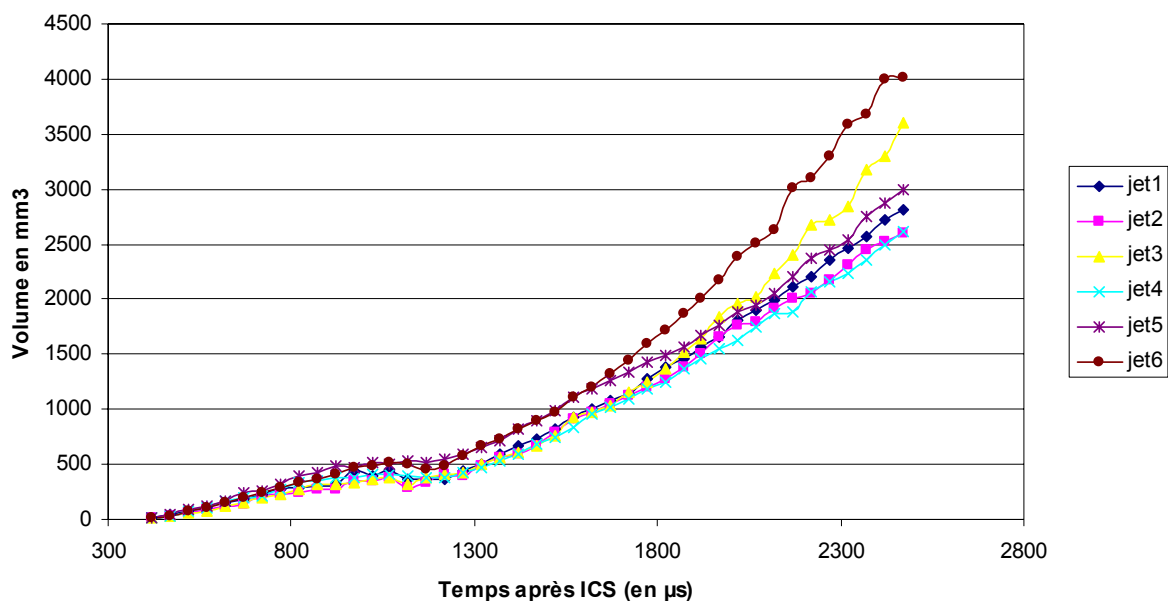


Figure 5-49 : Volume moyen pour la multi injection.

Au cours de la pré-injection, le volume augmente peu rapidement puis de façon très rapide au cours de l'injection principale.

5.1.6. Conclusions

Nous avons vu dans cette partie, les résultats que l'on peut obtenir en sortie de traitement de notre système. Il est très facile d'obtenir la représentation de la pénétration, de l'angle et du volume en valeur moyenne au cours de l'injection. Il est possible d'ajouter l'écart type à ces valeurs.

Si l'on veut obtenir de façon rapide l'évolution des paramètres sans avoir besoin de l'écart type, on peut étudier directement les images moyennes. Par contre il semble clair que l'écart type est un paramètre important car il permet d'étudier l'instabilité de l'injection.

5.2. Observations et mesures sur les images microscopiques

Dans cette partie, nous allons nous intéresser au début et à la fin de l'injection avec des observations microscopiques. Pour cette étude nous utilisons le montage ombroscopique décrit dans le chapitre 3.

Pour atteindre les futurs standards de régulation d'émission de particules, la distribution du fuel à l'intérieur de la chambre de combustion et la distribution en taille des gouttelettes doit être contrôlée convenablement que ce soit au début ou à la fin de l'injection. La connaissance des paramètres macroscopiques (étudiés précédemment) est une donnée importante mais il faut également pouvoir avoir accès aux paramètres microscopiques tels que le premier break up ou les ligaments de fin d'injection.

Nous allons tout d'abord décrire les observations faites sur un injecteur mono trou et multi trou pour le début et la fin de l'injection, puis nous aborderons les mesures réalisées sur ces images, notamment pour la détection automatique du début de l'injection et la mesure automatique de l'angle microscopique.

5.2.1. Observations

Nous allons observer le début et la fin d'injection et corréler nos observations à ce que l'on a trouvé dans la littérature (chapitre 2).

Les paramètres expérimentaux sont les suivants :

	Type	nb_{trous}	d_{inj}	l_{inj}
Injecteur mono trou	VCO	1	0.1	0.5
Injecteur 1	Sac	5	0.18	1

Tableau 5-4 : Paramètres de l'injecteur multi trou et mono trou.

Sur les images suivantes, un pixel représente 2.95 μm . Tous les instants mesurés sont à partir de l'ICS.

5.2.1.1. Observation du début de l'injection

Comme nous avons pu le voir au chapitre 2, le premier break up est un phénomène important dans la chaîne de combustion des moteurs récents à faible taux d'émission. En effet, il est à la base de la distribution du jet, du processus de pulvérisation de la formation du mélange et enfin du processus de combustion. (Lefebvre, 1989). Le phénomène de break up du jet lors de la pulvérisation n'est toujours pas bien compris notamment à cause de la complexité des structures interagissant comme les effets physiques de la cavitation, l'évaporation partielle dans le nez et aussi le break up en dehors du nez du aux chocs entre les bulles de cavitation, la séparation des gouttes ou des ligaments sous l'influence de l'entraînement d'air.

Pour ce type d'observations nous utilisons une caméra Sensicam, qui ne peut prendre (comme nous l'avons dit au chapitre 3) qu'un maximum de deux images par injection. Par conséquent les images que nous montrerons au cours de cette étude sont indépendantes les unes des autres. Lors des suites temporelles, les images ne proviennent pas de la même injection mais ont été choisies pour faire apparaître une suite temporelle.

Le positionnement de l'injecteur mono trou était assez facile, car le trou est dans l'axe de l'injecteur. Par contre, nous avons des difficultés de positionnement de l'injecteur multi trou, en effet, il ne fallait pas être gêné par le jet issu des autres trous. L'injecteur a d'abord été positionné à l'œil puis ensuite à l'image pour la netteté du champ.

Comme nous l'avons vu précédemment, Hattori et *al.*, 2004, proposèrent la structure d'ombrelle pour le mécanisme de break up. Ce phénomène a été observé au cours de notre étude notamment sur l'injecteur mono trou qui est comme pour Hattori un injecteur à sac.

La série complète d'images est donnée en annexe 12.

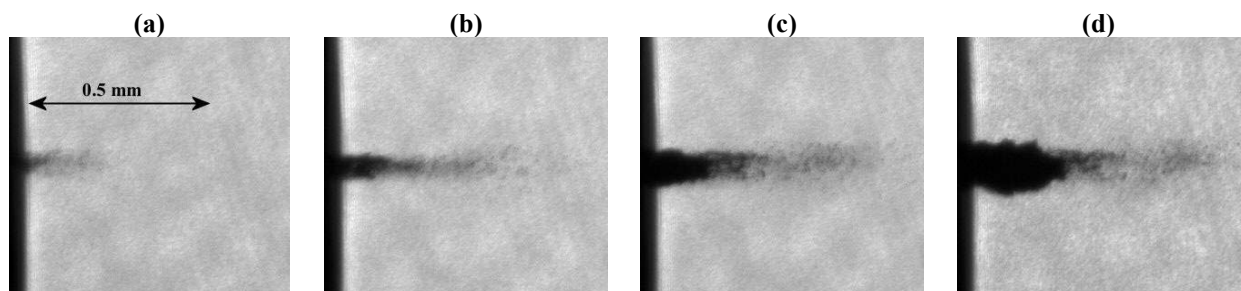


Figure 5-50 : Observation de la forme d'ombrelle (P_{inj} : 120 MPa, CP : 0 MPa).

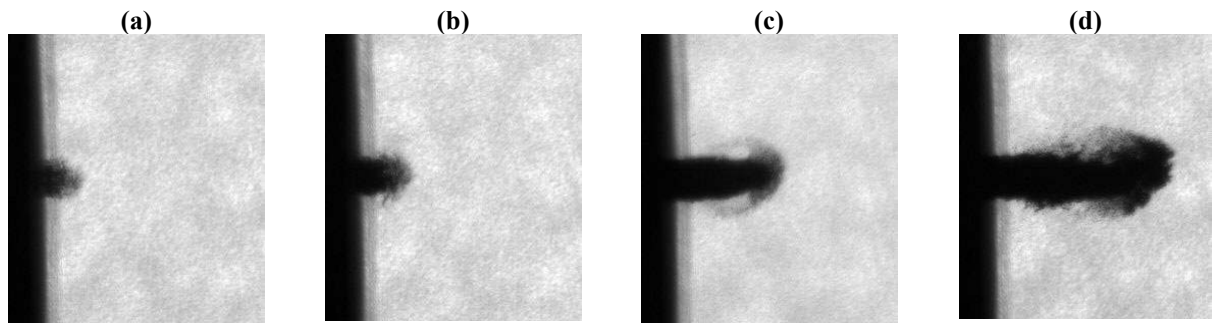


Figure 5-51 : Observation de la forme d'ombrelle (P_{inj} : 120 MPa, CP : 2 MPa).

Le phénomène d'ombrelle n'apparaît que lorsque la chambre est sous pression.

A pression atmosphérique, le spray est propulsé hors du trou sans être soumis aux forces de cisaillement de l'air. Le break up n'apparaît que bien plus tard, environ 12 μ s après le SOI contre 3-4 μ s après le SOI à 2 MPa de contre pression.

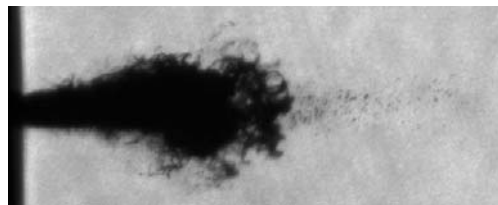


Figure 5-52 : Formation de ligaments aux bords du jet à pression atmosphérique.

Nous étions ici dans le cas d'un injecteur mono trou. Regardons ce qu'il se passe pour un injecteur multi trou.

Du à la salissure rapide des hublots et pour rester dans les mêmes conditions de température, l'étude pour l'injecteur multi trou a été faite avec une pression d'injection de 80 MPa à pression atmosphérique et une contre pression de 1 MPa (Figure 5-53 et Figure 5-54).

La série complète d'image est donnée en annexe 12.

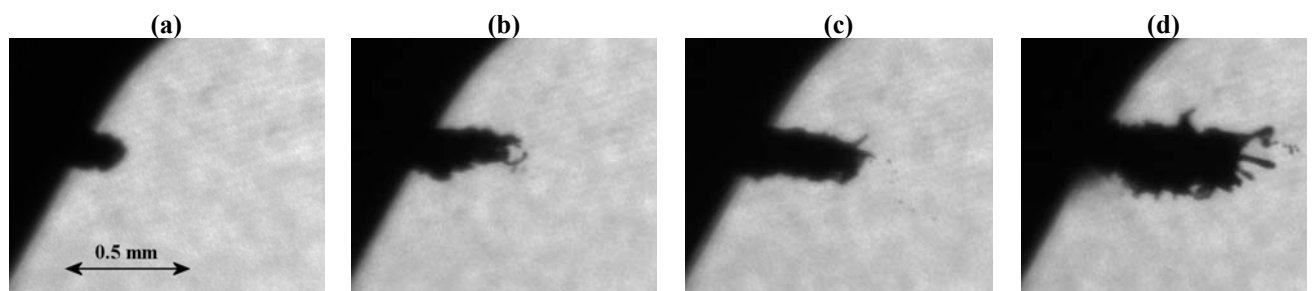


Figure 5-53 : Début d'injection pour un injecteur multi trou (P_{inj} : 80 MPa, CP : 0 MPa).

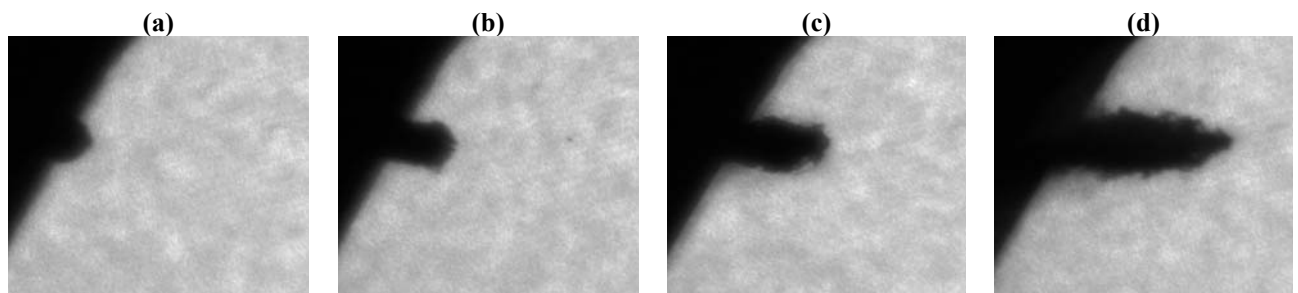


Figure 5-54 : Début d'injection pour un injecteur multi trou (P_{inj} : 80 MPa, CP : 1 MPa).

Comme pour l'injecteur mono trou des différences significatives sont visibles entre les injections ayant lieu à pression atmosphérique et en contre pression. La Figure 5-53 montre la présence de ligament en bordure de jet, chose qui n'est pas visible en contre pression.

On s'aperçoit que le début d'injection est différent de celui de l'injecteur mono trou. L'ombrelle (Figure 5-54 (c)) est moins prononcée voir quasi inexistante comparée aux observations faites sur l'injecteur mono trou. Plusieurs explications sont possibles : pression d'injection et contre pression, mais la plus probable est la différence dans la géométrie de l'injecteur. Le multi trou est un VCO alors que le mono trou est à sac, le volume mort est beaucoup plus important dans le cas du second. Ceci est corroboré par Heimgärtner et Leipertz, 2000. Ils ont montré qu'il y a des différences significatives entre les jets issus d'injecteurs mono-trou VCO et multi trou à 2 trous VCO et mini sac. Ces géométries sont détaillées en annexe 2. Par contre, il faut noter que l'étude a été faite lorsque l'aiguille est pleinement ouverte, c'est-à-dire que le flot est quasi stationnaire. Ils ont également constaté que l'angle du spray de l'injecteur mono trou VCO augmente avec la pression rail par opposition aux injecteurs multi trou VCO et mini-sac. Pour ces deux derniers l'angle diminue quand la pression d'injection augmente.

5.2.1.2. Observation de la fin de l'injection

Très peu d'études ont été réalisées sur la fin de l'injection, en comparaison aux études concernant le début de l'injection. Les phénomènes de fin d'injection peuvent avoir des conséquences sur la formation des particules et de suie.

Dans un premier temps, observons la fin d'injection pour un injecteur mono trou sans et avec contre pression (Figure 5-56 et Figure 5-57).

Comme pour le début de l'injection, la série complète d'images est donnée en annexe 12.

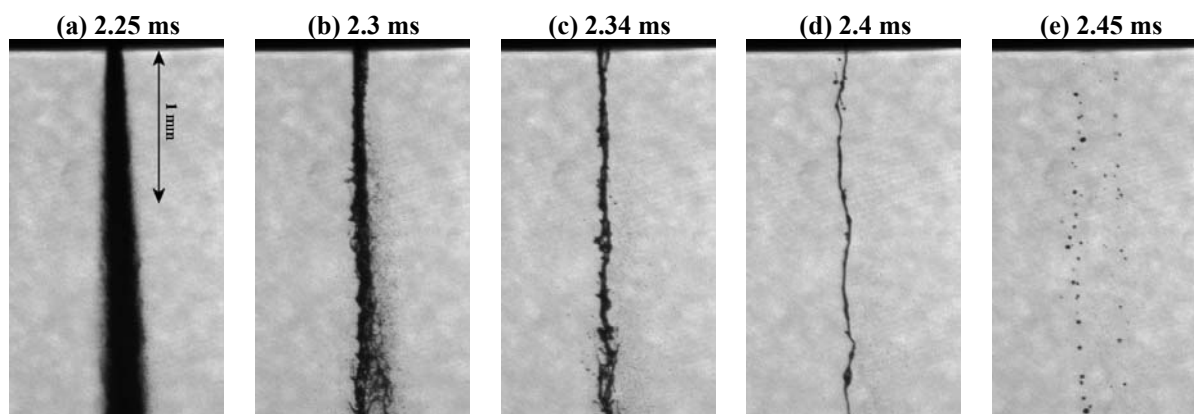


Figure 5-55 : Fin d'injection pour l'injecteur mono trou (P_{inj} : 120 MPa, CP : 0 MPa).

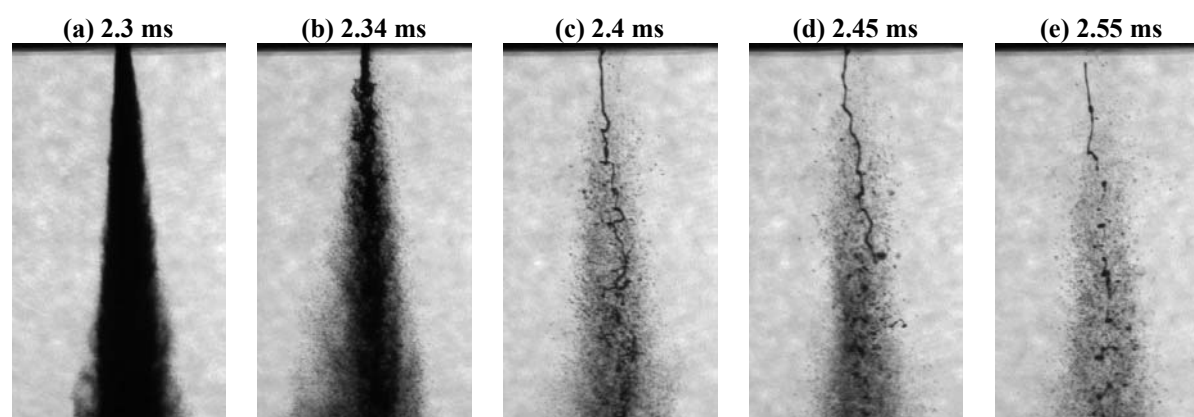


Figure 5-56 : Fin d'injection pour l'injecteur mono trou (P_{inj} : 120 MPa, CP : 2 MPa).

Observons ce qui se passe en fin d'injection pour un injecteur multi trou sans et avec contrepression (Figure 5-57 et Figure 5-58).

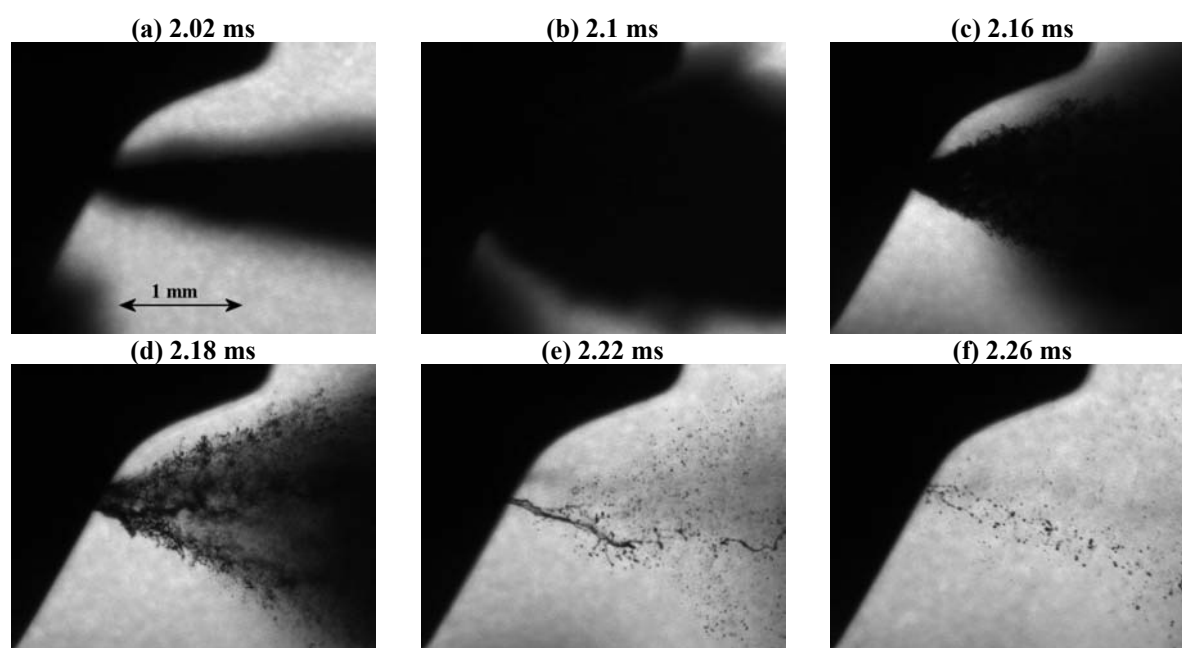


Figure 5-57 : Fin d'injection pour l'injecteur multi trou à pression atmosphérique (P_{inj} : 80 MPa, CP : 0 MPa).

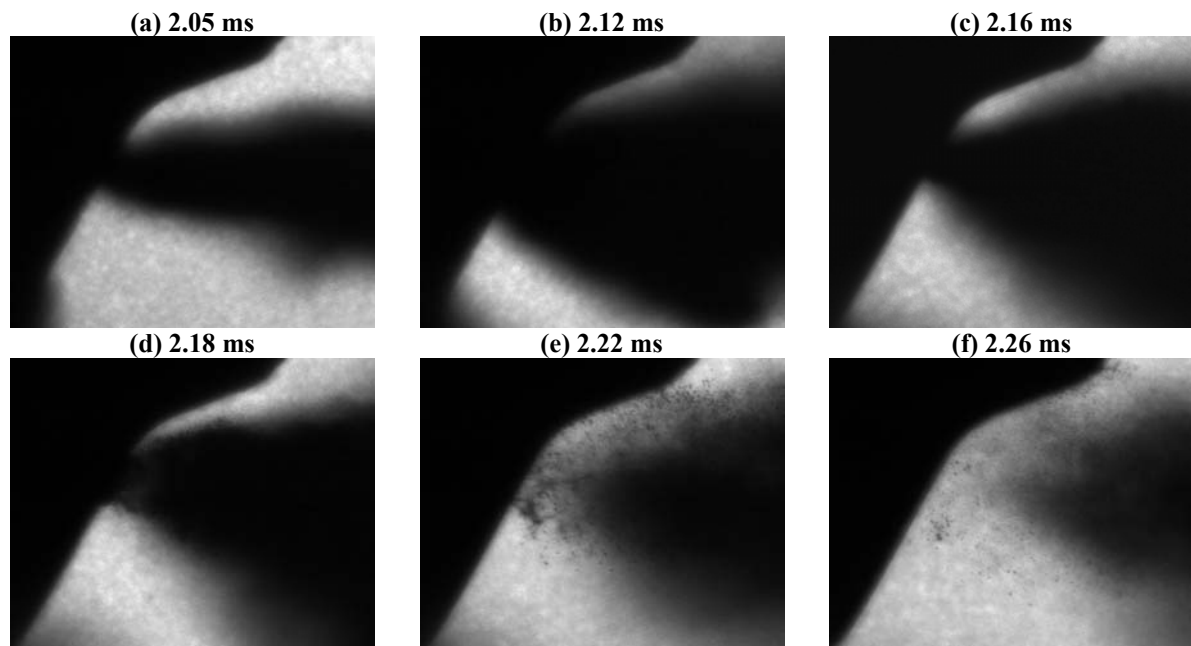


Figure 5-58 : Fin d'injection pour l'injecteur multi trou à haute pression (P_{inj} : 120 MPa, CP : 0 MPa).

Que ce soit pour l'injecteur mono trou ou multi trou et la contre pression, on s'aperçoit que lors de la fermeture de l'aiguille, le flot devient instable, l'angle microscopique s'élargit (Figure 5-56 (b)), de manière très importante pour l'injecteur multi trou (Figure 5-57 (b), Figure 5-58(b)). Et quand l'aiguille est finalement fermée, de grosses gouttes et des ligaments sortent du trou d'injection (Figure 5-55 (d) et (e), Figure 5-56 (d) et (e), Figure 5-57 (e) et (f), Figure 5-58 (e) et (f)). On peut s'apercevoir que la présence d'une contre pression permet une pulvérisation des ligaments et des gouttelettes si l'on compare les Figure 5-55 (e) et Figure 5-56 (e) pour l'injecteur mono trou et Figure 5-57 (f) et Figure 5-58 (f).

On peut noter que les ligaments et gouttes en fin d'injection sont beaucoup plus gros avec l'injecteur mono trou qu'avec l'injecteur multi trou. Le changement de technologie entre les deux injecteurs (sac pour le mono-trou et VCO pour le multi trou)) peut expliquer ces différences (Lai et *al.*, 1998)

La présence de ligaments et de grosses gouttes en fin d'injection peut augmenter l'émission de particules et de suie ce qui est nuisible pour atteindre les contrainte de régulation d'émission.

Blessing et *al.*, 2003 ont également observé cet important break up et l'augmentation de l'angle microscopique proche du nez qui apparaît à la fermeture de l'aiguille. Au cours de leur étude, ils ont fait des comparaisons et observé des différences entre un injecteur relié à une pompe distributrice (PLN : Pump Line Nozzle) et un injecteur CR. A cause de la diminution graduelle du flot lorsque l'aiguille se ferme, étape qui requiert plus de temps pour un injecteur CR, la pulvérisation devient très pauvre : phénomène de bavage (ligaments, grosses gouttes).

Ceci se voit surtout lorsque l'on approche la fin de la fermeture et que la pression sac devient très faible, ce qui entraîne un bavage de l'injecteur et donc une augmentation de l'émission de particules Schwarz et König, 1999.

5.2.2. Mesures microscopiques

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux images obtenues grâce au montage microscopique par ombroscopie. Nous nous sommes intéressés à la détection du début de l'injection, paramètre important pour les constructeurs pour connaître le délai existant entre le top électrique d'injection et l'apparition réelle de la première goutte au nez de l'injecteur. De plus comme pour les images macroscopiques, nous avons réalisé la mesure de l'angle microscopique. La connaissance de ces angles est importante pour l'amélioration des simulations numériques.

5.2.2.1. Détection du début de l'injection

Dans cette partie, nous allons voir une méthode pour détecter le début de l'injection c'est-à-dire l'apparition de la première goutte à la sortie de nez. Entre le top d'injection et l'apparition réelle de la goutte en sortie du trou, il existe un délai variable en fonction de la géométrie de l'injecteur, de la pression d'injection, de la contre pression mais également de l'électronique de l'injecteur. Les nouveaux injecteurs de type piezo électrique ont un temps de réponse beaucoup plus court que les injecteurs électro-magnétiques.

Connaître le délai entre l'ICS et le SOI est une donnée importante pour les constructeurs d'injecteurs mais également d'appareil de contrôle, afin d'étalonner leur appareil. L'imagerie permet d'avoir l'observation physique du phénomène.

Nous avons donc mis en place un processus de détection du début d'injection basé comme pour l'étude macroscopique sur une étude statistique. L'idée est la suivante : détecter par rapport à une image sans injection la première goutte sortant de l'injecteur et ceci pour un nombre moyen d'images données.

Pour détecter le début de l'injection, comme nous l'avons dit, nous allons comparer chaque image à une image sans injection (Figure 5-59). Cette image montre seulement l'injecteur. L'injection est découpée en plusieurs instants, généralement le début d'injection est plus ou moins connu. Une série de 30 images est réalisée pour chaque instant et nous comparons cette image à l'image de fond en réalisant la différence (Figure 5-60(b) et Figure 5-61 (b)). A l'aide d'un seuillage automatique, nous pouvons observer la présence ou non d'un jet (Figure 5-60 (c) et Figure 5-61 (c)). Le critère retenu pour affirmer que l'instant considéré est le début

d'injection est quand le nombre d'images où un jet est présent est de 50%, donc dans notre cas 15 images sur 30. On part d'un instant où il n'y a pas de jet et on augmente par pas de 10 μ s dans un premier temps puis 2 μ s.

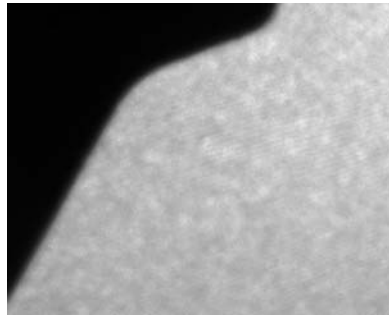


Figure 5-59 : Image de fond : sans injection.

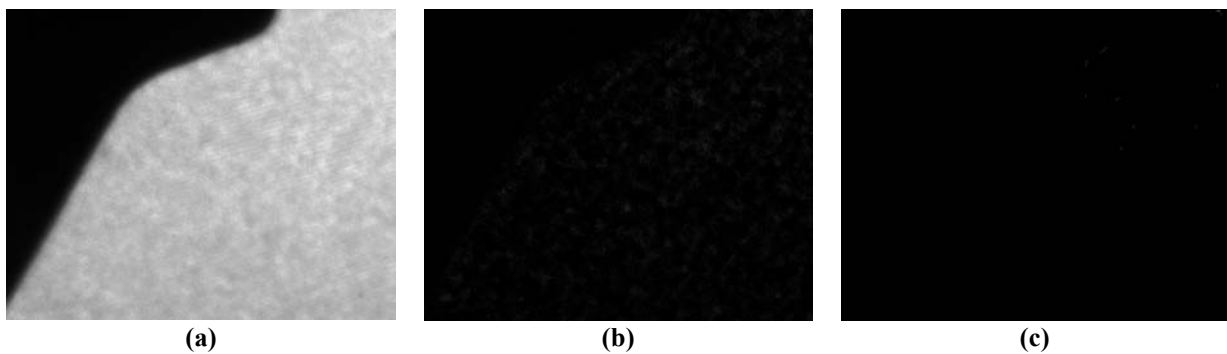


Figure 5-60 : (a) Image de série sans jet, (b) soustraction avec le fond Figure 5-59, (c) seuillage de (b).

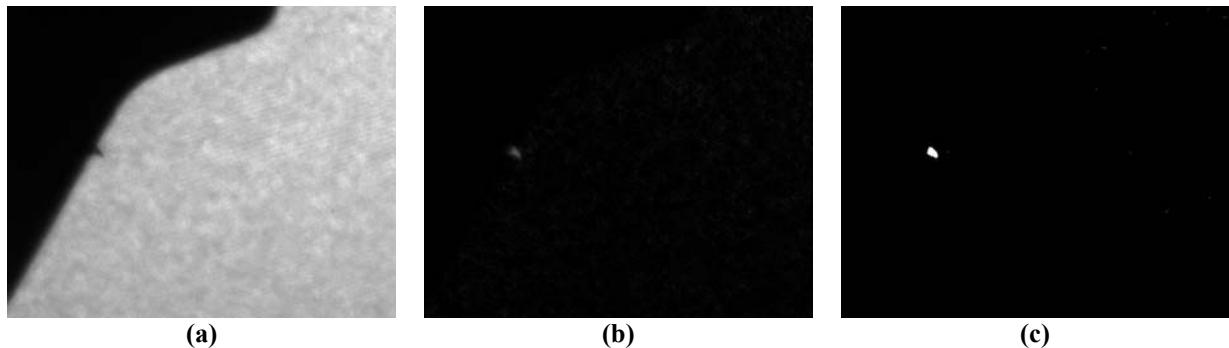


Figure 5-61 : (a) Image de série avec jet, (b) soustraction avec le fond Figure 5-59, (c) seuillage de (b).

5.2.2.2. Mesure de l'angle microscopique

Connaître l'évolution de l'angle microscopique au cours de l'injection est une donnée importante pour les constructeurs. La connaître de façon automatique et de manière répétable serait intéressante.

Le principe de la mesure de cet angle est basé sur le même principe que pour la mesure de l'angle macroscopique. En effet comme pour la segmentation des jets macroscopiques, la mesure de l'angle microscopique est très peu documentée dans la littérature. Il semble pour la plupart des études qu'il s'agisse de technique plus ou moins maison. Heimgärtner et Leipertz,

2000, utilisent un niveau qui inclut l'ensemble des gouttes du jet. Le niveau doit être modifié pour chaque image, l'utilisateur intervient donc dans le seuillage, notre but est d'éviter l'intervention de l'utilisateur dans l'étape de seuillage. Nous utiliserons un seuillage automatique basé sur la maximisation de la variance interclasse (Paragraphe 4.1.2).

Différentes définitions de cette angle existent dans la littérature (Lai et *al.*, 1998 ; Heimgärtner et Leipertz, 2000). Dans notre étude, l'angle est défini comme l'angle sous tendu par les segments de droite passant le mieux par le bord supérieur respectivement inférieur de la buse d'injection et l'ensemble des points du contour du jet sur une longueur de 2 mm.

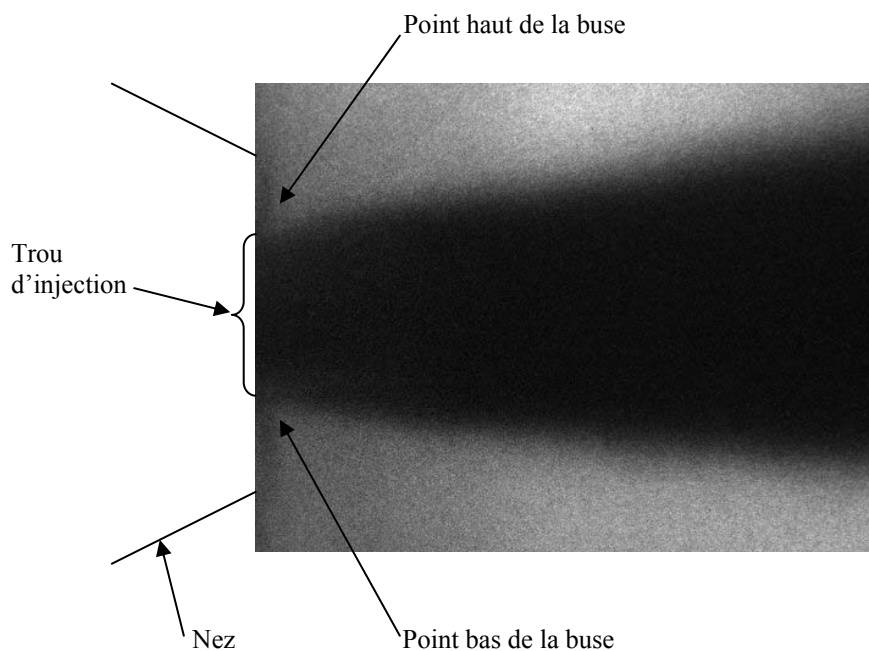


Figure 5-62 : Injection microscopique.

Résultats :

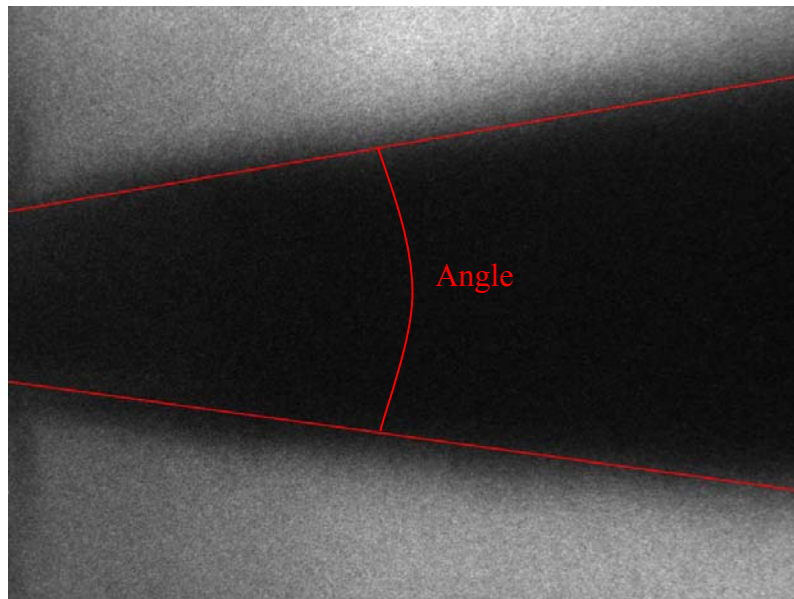


Figure 5-63 : Angle microscopique.

5.3. Position 3D des gouttelettes par holographie numérique

La technique d'holographie numérique a été appliquée à la détection et au positionnement de particules. Cette technique ne fonctionne que dans des milieux où la concentration n'est pas trop élevée. C'est pourquoi, nous nous sommes intéressés au positionnement des particules en bord de jet (Figure 5-64), c'est-à-dire aux gouttelettes arrachées lors de l'évolution du jet. La Figure 5-65 correspond à l'hologramme enregistré en utilisant le montage d'holographie en ligne présenté au chapitre 2 (Figure 3-11).

L'injecteur utilisé est un injecteur mono trou. La pression d'injection est de 80 MPa. La durée d'injection est de 1500 μ s et l'expérience a eu lieu à pression atmosphérique.

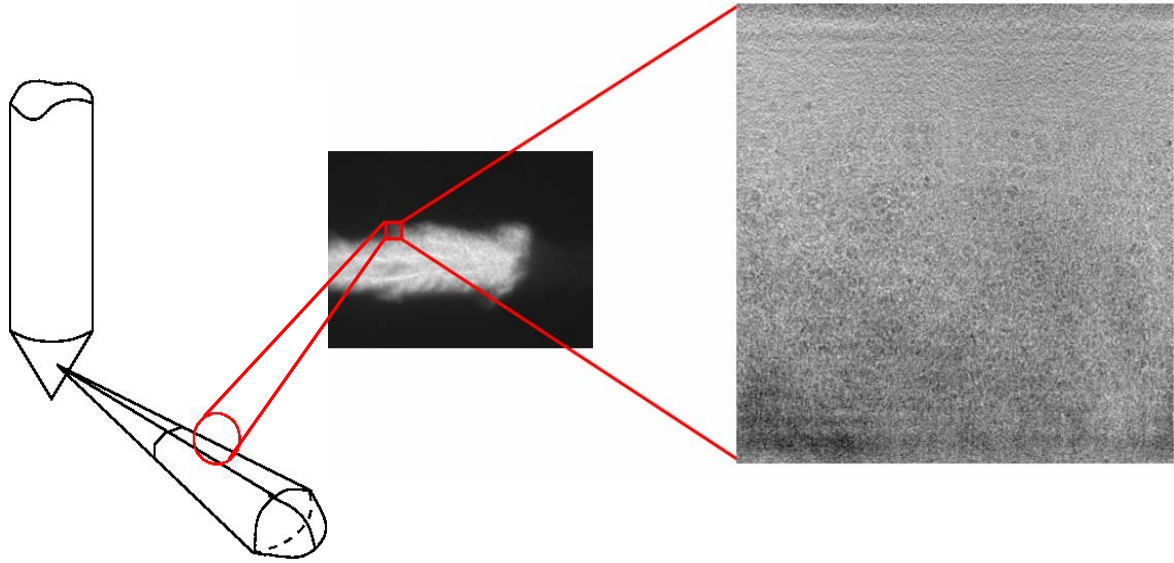


Figure 5-64 : Position de l'hologramme dans le jet global.



Figure 5-65 : Exemple hologramme en bord de jet.

La Figure 5-66 représente un plan restitué à partir de l'hologramme Figure 5-65.

On observe sur cette image les différents motifs de diffraction : les systèmes d'anneaux autour des gouttelettes défocalisées et les images nettes des gouttelettes au point.

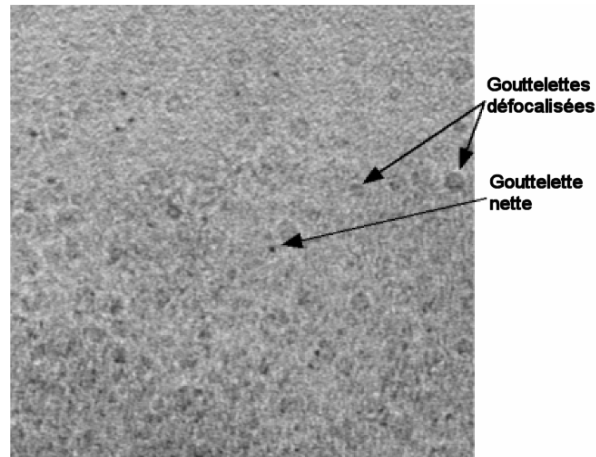


Figure 5-66 : Extraction d'une fenêtre d'un plan restitué à la distance $Z=37$ mm.

Pour reconstruire le jet diesel en 3D à partir de l'hologramme de la Figure 5-65, nous avons restitué 100 plans, espacés de $100\ \mu\text{m}$, à des distances de 30 mm à 40 mm du capteur.

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre 4, sur chaque plan restitué, on choisit de détecter les gouttelettes nettes au moyen de la transformée VDIP. Les rayons des cylindres sont de 2 et 5 pixels (Figure 4-34). L'incertitude sur la position en Z a été évaluée à $\pm 100\ \mu\text{m}$.

Le résultat obtenu est présenté figure 8. Elle montre la répartition en 3 dimensions des gouttes en périphérie de jet. Le champ observé est de 2,5 mm de long sur 1,5 mm et pour une profondeur d'étude de 1 mm

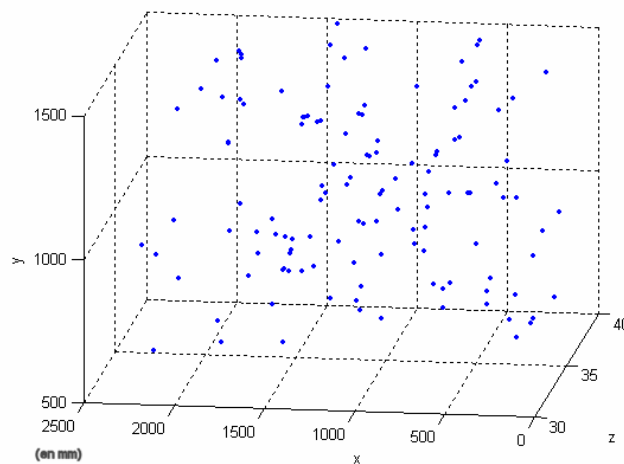


Figure 5-67 : Champ 3D reconstruit de particules situées en bordure du jet haute-pression.

L'holographie numérique est une méthode en plein essor et qui semble très prometteuse pour l'étude de champ de particules. Cependant la faible résolution des capteurs est toujours un point critique qui peut être compensé grâce aux techniques de traitement d'images.

Conclusion

Dans le cadre d'une thèse Cifre, un système automatique de diagnostic optique de jet d'injecteur diesel haute pression, a été développé au sein de la société EFS (Montagny, 69), en collaboration avec deux équipes de recherche (l'équipe IMAGE du laboratoire LTSI de l'Université Jean Monnet de Saint Etienne et l'équipe Diphasique du laboratoire LMFA de l'Ecole Centrale de Lyon).

Le démonstrateur commercial nommé INJETVISION permet de réaliser des injections dans un milieu de pression proche des conditions moteur à froid. Les mesures des paramètres morphologiques (pénétration, angle, volume) sont obtenues de façon automatique, et il est également possible de zoomer sur d'autres paramètres tels que le début ou la fin d'injection.

Le prototype industriel

Le prototype industriel comprend essentiellement un générateur de haute pression, un éclairage en lumière blanche, une caméra intensifiée et une chambre pressurisée jusqu'à 50 bars (Figure 3-3 et Figure 3-4). Un logiciel a été réalisé pour permettre l'acquisition automatique de l'ensemble des images de l'injection et leurs traitements dans le but d'extraire de leurs contours les paramètres morphologiques. De plus en mesurant la masse injectée à l'aide d'un *MIQ* (système de qualification mono injecteur), il est possible d'en déduire une richesse globale du mélange. Le générateur de haute pression et le *MIQ* sont déjà produits et commercialisés par la société.

Le générateur de pression commercialisé par la société EFS est un banc d'injection d'étude muni d'un système « common rail ». La pression à l'intérieur de la rampe peut atteindre 160 MPa. Différents types d'injecteurs diesel haute pression peuvent être étudiés (mono trou ou multi trou) Les expériences ont été réalisées avec de l'huile de test normalisée ISO 4113.

L'injection est réalisée dans une chambre de pression spécialement conçue au cours de cette thèse disposant de 6 ouvertures sur lesquelles peuvent être montés indifféremment des hublots de visualisation, un support injecteur ou un système d'aspiration de brouillard. Il est à noter qu'un des hublots est muni d'un système d'évacuation de l'huile injectée. Cette chambre est instrumentée de capteurs de pression et température et d'une soupape de sécurité tarée à 5 MPa.

Pour la vision du phénomène d'injection, une caméra CCD intensifiée est employée, permettant, à partir d'un simple éclairage halogène continu, de figer l'injection avec un temps de pose de 240 ns.

Ce système a été développé dans un premier temps pour des investigations à grands champs (champs de 100 mm de diamètre), c'est-à-dire l'observation de l'ensemble des jets issus des trous de l'orifice d'injection et leurs comparaisons. Du fait de sa grande modularité, des investigations par ombroscopie ou par holographie numérique sur petit champ, pour l'observation du début de l'injection ou pour l'observation des gouttelettes ont également été réalisées, mais elles ne sont pas encore implémentées de façon automatique dans le système. Par rapport aux chambres antérieurs, telles que celle de Payri, 1996 ou de Fettes, 1999, notre système présente certains avantages :

- compacité
- modularité
- facilité de transport
- faciliter de mise en œuvre.

Le traitement d'image

Quatre méthodes ont été comparées entre elles : détection par seuillage par maximisation de l'entropie, par seuillage par maximisation de la variance interclasse, par Canny, par divergence de Jensen-Shannon.

	<i>Intervention utilisateur</i>	<i>Temps de calcul</i>	<i>Pénétration</i>	<i>Angle</i>	<i>Volume</i>
<i>Seuillage par maximisation de l'entropie</i>	0 paramètre	<1s	t=1000 μ s : bon (3.3%) t=300 μ s : moyen (5.2%) t=100 μ s : moyen (4.6%)	t=1000 μ s : bon (1.7%) t=300 μ s : mauvais (29%) t=100 μ s : mauvais (30%)	mauvais sur l'ensemble (<40%)
<i>Seuillage par maximisation de la variance interclasse</i>	0 paramètre	<1s	bon sur l'ensemble (<2.7%)	Moyen sur l'ensemble (<10%)	moyen sur l'ensemble (<10%)
<i>Canny</i>	2 ou 3 paramètres	<2s	t=1000 μ s : bon (1.5%) t=300 μ s : bon (2.7%) t=100 μ s : moyen (6.7%)	Moyen sur l'ensemble (<9%)	moyen sur l'ensemble (<10%)
<i>JS</i>	2 ou 3 paramètres	<3s	bon sur l'ensemble (<3%)	Moyen sur l'ensemble (<10%)	t=1000 μ s : bon (3.22%) moyen sur le reste (<10%)

Tableau C- 1 : Comparaison des différentes méthodes de traitement d'images.

Compte tenu des résultats obtenus au chapitre 4 et rappeler dans le Tableau C- 1, nous avons décidé, en se basant sur les critères de rapidité, de simplicité et d'absence de paramètres de réglage, d'utiliser la méthode de seuillage automatique par maximisation de la variance interclasse.

Une fois le contour obtenu, il est possible d'obtenir les paramètres morphologiques des jets. Une étape supplémentaire a été implémentée permettant de corriger la mesure directe de la pénétration en projection sur le plan image de la nappe, pour tenir compte de l'inclinaison des

axes des trous par rapport à ce plan image(Chapitre 4) (principe non mis en œuvre dans la littérature).

La Figure C- 1résume les différentes étapes de l’algorithme de traitement d’image implémenté dans le système en partant du calibrage de la caméra jusqu’à la mesure des paramètres.

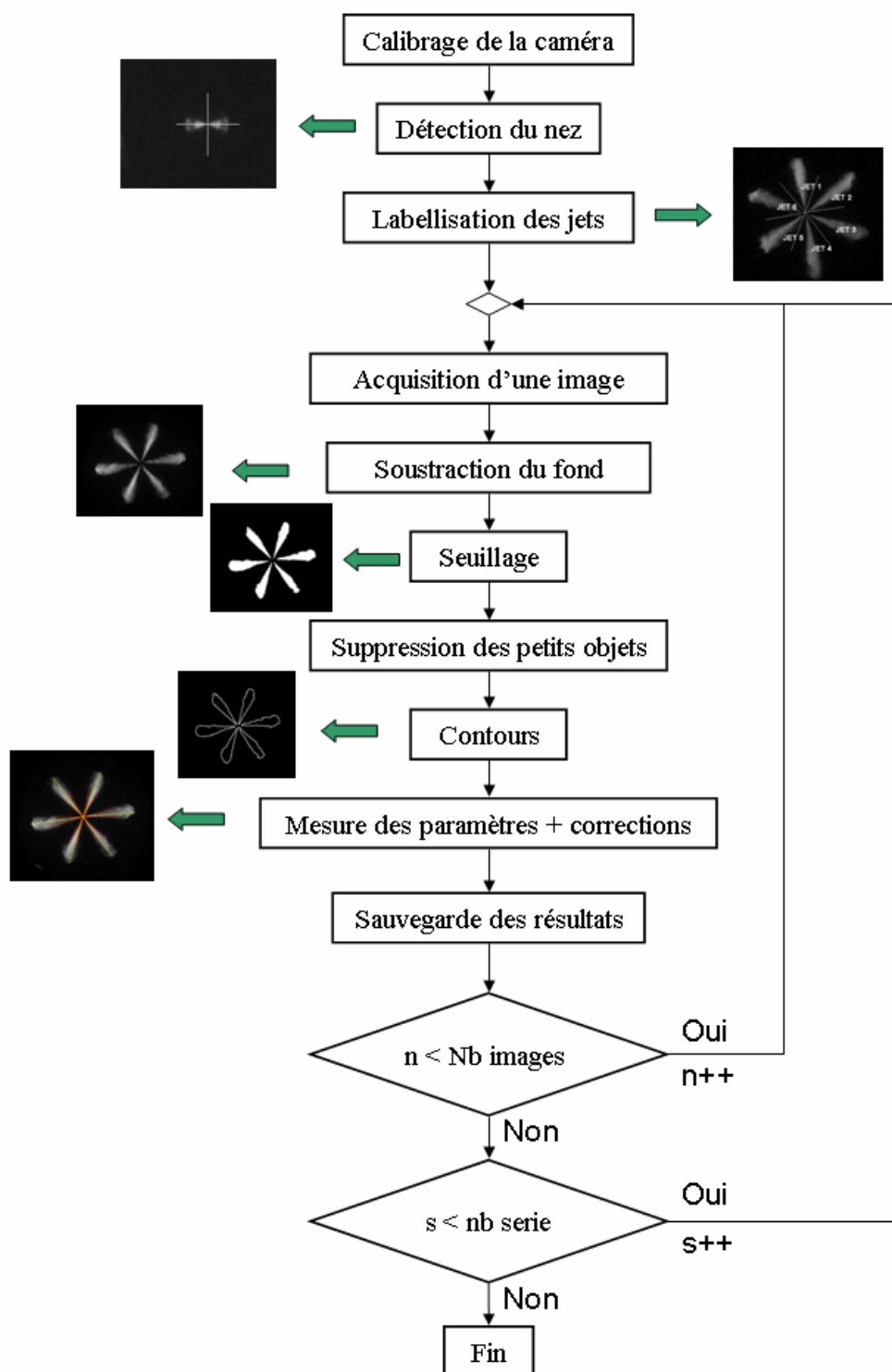


Figure C- 1 : Synoptique de l’algorithme de traitement d’images.

Concernant les mesures à petit champ, l'holographie numérique donne de bons résultats pour le positionnement des particules et mériterait une étude plus approfondie. Des recherches concernant une détermination de la granulométrie d'un milieu à partir du simple hologramme sont en cours au sein de l'équipe IMAGE du LTSI et permettront de fournir très rapidement une approximation de la densité du milieu.

Résultats sur les sprays

- Nous disposons désormais d'un système de mesure automatique de visualisation et d'analyse de sprays. Toutes les étapes fastidieuses de réglage du délai, de réalisation de séquence d'images, de mesure de paramètres n'existent plus avec notre système. L'automatisme du système nous permet un échantillonnage beaucoup plus riche de l'évolution de l'injection que par les systèmes de traitement manuel. Ainsi typiquement la pénétration est définie par une série de l'ordre de 25 points (chacun correspondant à une moyenne de 40 pénétrations mesurées à chaque instant) s'étalant sur toute l'évolution de l'injection. Ne pouvant fonctionner qu'à une basse fréquence (entre 0.2 et 0.5 Hz maximum), afin d'assurer une bonne évacuation du brouillard, la caractérisation d'une injection, dans des conditions de pression d'injection et de contre pression données, prend, pour une série de 30 points sur l'injection avec 40 images pour chaque point (soit 1200 images), environ 2 heures.
- Des séries de mesures sur deux injecteurs différents ont été réalisées dans le but d'établir des comparaisons entre injecteurs.
- En sortie de traitement complet, nous obtenons l'évolution de la pénétration, de l'angle et du volume en fonction de l'injection en moyenne, écarts type, minimum et maximum. En comparant nos résultats de pénétration avec les prédictions de la littérature (Dent, 1971 ; Hiroyasu et Arai, 1990), nous avons constaté que ces lois surestiment la mesure. La loi de pénétration donnée par Hiroyasu ayant été établie à partir des équations de Levich, 1962, nous avons décidé de repartir de ces formules et nous avons élaborés une nouvelle prédiction.

Pour l'injecteur 1 :

Pour $t < t_{break}$:

$$S = 0,5 \left(\frac{2\Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0,5} t (2)$$

Pour l'injecteur 2 :

Pour $t < t_{break}$:

$$S = 0,58 \left(\frac{2\Delta P_l}{\rho_l} \right)^{0,5} t (2)$$

Pour $t > t_{break}$:

$$S = 2,59 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0,25} (d_{inj} t)^{0,5} \quad (3)$$

Pour $t > t_{break}$:

$$S = 2,59 \left(\frac{\Delta P_l}{\rho_g} \right)^{0,25} (d_{inj} t)^{0,5} \quad (3)$$

$$\text{Avec } t_{break} = 13 \rho_l d_{inj} (\rho_g \Delta P_l)^{-0,5}$$

$$\text{Avec } t_{break} = 9.66 \rho_l d_{inj} (\rho_g \Delta P_l)^{-0,5}$$

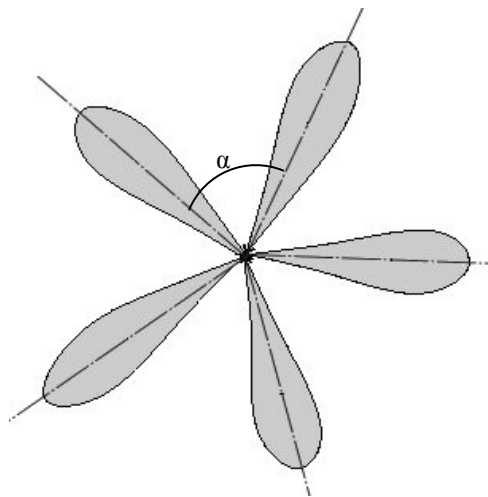
Elle répond de manière très satisfaisante à nos observations quelle que soit la pression amont ou aval de l'orifice d'injection du jet.

- Des mesures de richesse moyenne instantanée du spray ont pu être réalisées à partir de nos mesures de volume et des mesures de débits effectuées dans les mêmes conditions de pression d'injection et de contre pression. La richesse varie de 100, 10 microsecondes après le début d'injection à 2 en fin d'injection.
- Concernant les études à petit champ, nous avons observé les phénomènes de premier break up au début de l'injection et de bavage de l'injecteur en fin d'injection. Des mesures d'angle microscopique ont également été réalisées. L'holographie numérique semble être une piste intéressante pour le positionnement 3D des particules en bord de jet et pour la mesure de diamètre de goutte mais est limité par la taille actuelle des capteurs et les fortes concentrations à l'intérieur des jets diesel.

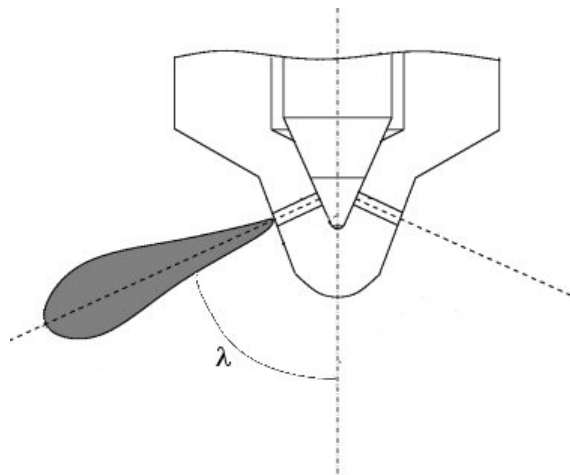
Perspectives

Du point de vue du système industriel, de nombreuses améliorations sont en cours d'étude ou ont déjà aboutit à des résultats :

- Mise en place de mesure de nouveaux paramètres
 - angle inter jet (nommé α) : qui sera déterminé comme l'angle entre les bissectrice des angle d'ouverture de chaque jet (Figure C- 2 (a)).
 - angle de nappe (nommé λ) : c'est-à-dire l'angle entre l'axe de l'injecteur et le jet (Figure C- 2 (b)). Pour cela il faudra mettre en place un système de cache des autres jets (déflecteur de jets) afin de ne pas être masqué les jets non étudiés.
 - mise au point de la détection automatique du début de l'injection soit par étude microscopique ou macroscopique.



(a) Mesure de l'angle α



(a) Mesure de l'angle λ

Figure C- 2 : Nouvelle mesure d'angle.

- Corrélation automatique avec les mesures de débit pour l'obtention automatique de la mesure de richesse.
- Etude de nouveaux algorithmes pour la détection des contours tels que les lignes de partages des eaux.
- Etude de la mesure de température au nez de l'injecteur par fluorescence
- Modifications de la conception mécanique de la chambre afin de répondre :
 - aux exigences de la directive européenne sur les équipements sous pression.
 - aux problèmes mécaniques rencontrés sur le prototype tant du point de vue utilisateur que traitement d'image :
 - réflexion gênante à l'intérieur de la chambre
 - goutte d'huile stagnante sur le porte injecteur
 - montage rapide des hublots
- Commercialisation du système

Publications

Seneschal (J.), Ducottet (C.), Bochar (N.), Gucher (P.), Champoussin (J.C.)

Visualization of High Pressure Diesel Sprays from Single and Multi-Hole Injectors
FISITA 2002, Helsinki, FINLAND, June 2002.

Luque Escamilla (P.L.), Seneschal (J.), Gomez Lopera (J.F.), Ducottet (C.), Martinez Aroza (J.), Champoussin (J.C.)

Characterisation of High Pressure Diesel Fuel Sprays By Entropic Edge Detection
ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, SPAIN, September 2002.

Luque Escamilla (P.L.), Gomez Lopera (J.F.), Martinez Aroza (J.), Seneschal (J.), Román Roldán (R.)

Método de Detección de Bordos Entrópico Aplicado al Diseño de Inyección de Chorros Diesel
Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica 2002, Cadiz, Spain, december 2002.

Seneschal (J.), Ducottet (C.), Schon (J.P.), Champoussin (J.C.), Gucher (P.)

Automatic System for Visualization and Characterization of High Pressure Diesel Sprays
PSFVIP 4, Chamonix, June 2003.

Seneschal (J.), Fournier (C.), Barat (C.), Fournel (T.)

Segmentation 3D d'Hologrammes Numériques de Particules par Palpage Morphologique : Application à l'Analyse d'un Jet Diesel Haute-Pression
GRETSI'03, Paris, France, 2003.

Pietroy (D.), Fournier (C.), Ducottet (C.), Seneschal (J.), Fournel (T.)

Calibrage d'un Montage d'Holographie Numérique en Ligne Intégrant un Objectif
4ème Colloque francophone : Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Belfort, France, 2003.

Seneschal (J.), Maurin (B.), Champoussin (J.C.), Ducottet (C.)

A Fully Automatic System for the Morphology Characterization of High Pressure Diesel Sprays
SAE 2004-01-0025, SP-1824, March 2004.

Denis (L.), Fournier (C.), Ducottet (C.), Fournel (T.), Seneschal (J.), Jeulin (D.)

Estimation de Taille de Particules Directement à Partir d'un Microhologramme Numérique
5^{ème} colloque francophone : Méthode et Techniques Optiques pour l'industrie, Saint Etienne, France, 2004.

Références bibliographiques

Agam (G.), Dinstein (I.)

Generalized Morphological Operators Applied to Map-Analysis
SSPR-96, Leipzig, Germany, 1996.

Anezaki (Y.), Shirabe (N.), Kanehara (K.), Sato (T.)

3D Spray Measurement System for High Density Fields Using Laser Holography
SAE Paper no. 2002-01-0739, 2002.

Arbeau (A.), Bazile (R.), Ben (L.), Charnay (G.), Gastaldi (P.)

Application of PIV Technique and Use of Fluorescent Tracers to Direct Measurements of Air Entrainment in Diesel Sprays
THIESEL 2004, Valence, Espagne, 2004.

Arrègle (J.), Pastor (J. V.), Ruiz (S.)

The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics
SAE paper no. 1999-01-0200, 1999.

Atae Allah (C.), Cabrerizo Vilchez (M.), Gómez Lopera (J.F.), Holgado Terriza (J.), Luque Escamilla (P.L.), Roman Roldan (R.R.)

Measurement of Surface Tension and Contact Angle using Entropic Edge Detection
Measurement Science and Technology, 12, pp. 288-298, 2001.

Badock (C.), Wirth (R.), Fath (A.), Leipertz (A.)

Investigation of Cavitation in Real Size Diesel Injection Nozzles
Int. J. Heat and Fluid Flow, 20, pp. 538-544, 1999.

Badock (C.), Wirth (R.), Tropéa (C.)

The Influence of Hydro Grinding on Cavitation Inside a Diesel Injection Nozzle and Primary Break-up under Unsteady Pressure Conditions
ILASS'99, Toulouse, France, 1999.

Bae (C.H.), Kang (J.)

Diesel Spray Characteristics of Common-Rail VCO Nozzle Injector
THIESEL 2000, Valence, Espagne, 2000.

Bae (C.), Yu (J.), Kang (J.), Kong (J.), Cuenca (R.), Lee (C.O.)

The Influence of Injector Parameters on Diesel Spray
THIESEL 2002, Valence, Espagne, 2002.

Barat (C.), Ducottet (C.), Jourlin (M.)

Mise en Correspondance de Formes à Niveaux de Gris par Palpage Morphologique
GRETSI 2003, volume 3, pp :138, Paris, 2003.

Barranco Lopez (V.), Luque Escamilla (P.L.), Martinez Aroza (J.), Roman Roldan (R.R.)

Entropic Texture Edge Detection for Image Segmentation
Electronics Letters, 31 11, 1867-869, 1995.

Baz (I.)

Contribution à la Caractérisation de la Cavitation dans les Injecteurs Diesel à Haute Pression
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2003.

Becchi (G.A.)

Analytical Simulation of Fuel Injection in Diesel Engines
SAE paper no. 710568, 1971.

Bergstrand (P.), Denbratt (I.)

Diesel Combustion with Reduced Nozzle Diameter
SAE paper no. 2001-01-2010, 2001.

Bermudez (V.), Garcia (J.M.), Julia (E.), Martinez (S.)

Engine with Optically Accessible Cylinder Head : A Research Tool for Injection and Combustion Process
SAE paper no. 2003-01-1110, 2003.

Blessing (M.), König (G.), Krüger (C.), Michels (U.), Schwarz (V.)

Analysis of Flow and Cavitation Phenomena in Diesel Injection Nozzles and Its Effects on Spray and Mixture Formation
SAE Paper no. 2003-01-1358, 2003.

Bochard (N.), Baz (I.), Ducottet (C.), Boedec (T.), Gucher (P.), Champoussin (J.C.), Schon (J.P.)

Nouvelles Techniques de Visualisation Appliquées à l'Etude de l'Injection Diesel Haute Pression
Optique et Photonique 4: 26-28, 2001.

Bower (G.R.), Foster (D.E)

A Comparison of the Bosch and Zuech Rate of Injection Meters
SAE Paper no. 910724, 1997.

Bochard (N.), Baz (I.), Ducottet (C.), Boedec (T.), Gucher (P.), Champoussin (J.C.), Schon (J.P.)

Nouvelles Techniques de Visualisation Appliquées à l'Etude de l'Injection Diesel Haute Pression
Photoniques, revue de la Société Française d'Optiques, 2001, pp. 26-28.

Bosch (W.)

The Fuel Rate Indicator : A New Measuring Instrument For Display of the Characteristic of Individual injection
SAE Paper no. 660749, 1966.

Bosch

Système d'Injection Diesel à Accumulateur « Common Rail »
Cahier technique, 1999.

Burrage-Lefebvre (C.), Coëtmellec (S.), Lebrun (D.), Ozkul (C.)

Application of Wavelet Transform to Hologram Analysis : Three-Dimensional Location of Particles

Optics & Lasers in Engineering, Vol. 33, pp 409-421, 2000.

Campanella (R.), Laforgia (D.), Ficarell (A.), Damiani (V.)

Spray Characteristics of Five-Hole V.C.O. Nozzles of a Diesel Electro-Injector.

SAE paper no. 940192, 1992.

Canny (J.)

A Computational Approach to Edge Detection

IEEE Trans. Pattern. Anal. Mach. Intell. PAMI-8, pp. 679 – 686, 1986.

Castellanos (J.M.)

Caractérisation de Sprays Diesel Haute Pression par Analyse d'Images Ombroscopiques

DEA, Ecole Centrale de Lyon, 2002.

Castleman (K.R.)

Digital Image Processing

Prentice-Hall, 1996.

Chagnot-Auclair (F.)

Etude Expérimentale de l'injection Diesel par Imagerie Ultrarapide

DEA, Ecole Centrale de Lyon, 1998.

Chang (C.T.), Farrell (P.V.)

Spray characteristics and Near Injector Tip Effects of Injection Pressure and Ambient Density

COMODIA, pp. 465-470, 1998.

Chaves (H.), Knapp (M.), Kubitzek (A.), Obermeier (F.), Schneideri (T.)

Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors using Transparent Nozzles

SAE Paper no. 950290, 1995.

Crane Company

Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe

Technical Paper No. 410 (TP 410), 1988.

Dan (T.), Takagishi (S.), Senda (J.) Fujimoto (H.)

Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-reacting Diesel Fuel Spray

SAE Paper no. 970352, 1997.

De Corso (S.M.), Kemeny (G.A.)

Effect of Ambient and Fuel pressure on Nozzle Spray Angle

Trans. ASME, Vol. 79, No3, pp 607l-615, 1957.

Delacourt (E.), Desmet (B.), Besson (B.)

Mesurage des Caractéristiques Géométriques et Cinématiques des Jets d'Injection Diesel par Analyse d'Images

4^{ème} colloque francophone Méthode et Techniques Optiques pour l'industrie, club CMOI, Belfort, 2003.

Denis (L.), Fournier (C.), Ducottet (C.), Fournel (T.), Seneschal (J.), Jeulin (D.)

Estimation de Taille de Particules Directement à Partir d'un Microhologramme Numérique

5^{ème} colloque francophone Méthode et Techniques Optiques pour l'industrie, club CMOI, Saint Etienne, 2004.

Dent (J.C.)

A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration
SAE Paper no. 710571, 1971.

Desantes (J. M.), Arrègle (J.), Pastor (J. V.), Delage (A.)

Influence of the Fuel Characteristics on the Injection Process in a D.I. Diesel Engine

SAE paper no. 980802, 1998.

Dobovisek (Z.), Cernej (A.), Filipovic (I.)

The Influence of Fuel Compressibility and Heating Value Changes on Injection Parameters

SAE paper no. 845077, 1984.

Ducottet (C.), Fournel (T.), Barat (C.)

Scale-Adaptive Detection and Local Characterization of Edges Based on Wavelet Transform

Signal Processing 84: 2115–2137, 2004.

Dumouchel (C.)

Atomisation et Spray

Mémoire d'habilitation à diriger la recherche, 1996.

Fath (A.), Fettes (C.), Leipertz (A.)

Investigation of the Diesel Spray Break-Up Close to the Nozzle at Different Injection Conditions

COMODIA symposium, pp.429-434, 1998

Fath (A.), Münch (C.), Leipertz (A.)

Spray Break-Up Process of Diesel Fuel Investigated Close to the Nozzle

ICLASS'97, Séoul, Corée, pp. 513-520, 1997.

Fayolle (J.), Riou (L.), Levy (N.)

Application of Advanced Image Processing Tools to the Characterization of Diesel Jets

8th International Symposium on Flow Visualization, 1998.

Fettes (C.), Shünemann (E.), Leipertz (A.)

Common-Rail vs. High-Pressure Distributor Pump : Comparison of Temporal and Spatial Propagation

Proceedings of ILASS-EUROPE'99, Toulouse, France, 1999.

Fournier (C.)

Holographie Numérique pour la Vélométrie par Images de Particules : extraction des 3 composantes du champ de vitesse dans une Volume
Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 2003.

Frohn (A.), Roth (N.)

Dynamics of Droplets
SpringerVerlag Berlin Heidelberg New York, Berlin, ISBN : 3-540-65887-4, 2000.

Gavaises (M.), Arcoumanis (C.), Roth (H.), Choi (Y.S.), Theodorakakos (A.)

Nozzle Flow and Spray Characteristics from VCO Diesel Injector Nozzles
THIESEL 2002, Valence, Espagne, 2002.

Giffen (E.), Massey (B.S.)

Report 1950/5
Motor Industry Research Association, England, 1950.

Gómez-Lopera (J.F.), Robles-Pérez (A.M.), Martínez-Aroza (J.), Román-Roldán (R.)

An Analysis of Edge Detection by using the Jensen-Shannon Divergence
J. Mathematical Imaging and Vision 13(1), pp. 35-56, 2000.

Hadwiger (H.)

Vorlesungen über Inhalt, Oberfläche und Isoperimetrie
Springer Verlag, Berlin, 1957.

Hattori (H.), Narumiya (K.), Tsue (M.), Kadota (T.)

Analysis of Initial Breakup Mechanism of Diesel Spray Injected into High-Pressure Ambience
SAE Paper no. 2004-01-0528, 2004.

Hay (N.), Jones (P.L.)

Comparison of the Various Correlations for Spray Penetration
SAE Paper no. 720776, 1972.

Heimgärtner (C.), Leipertz (A.)

Investigation of the Primary Spray Breakup Close to the Nozzle of a Common – Rail High Pressure Diesel Injection System
SAE Paper no. 2000-01-1799, 2000.

Heywood (J.B.)

Internal Combustion Engine Fundamentals
McGraw-Hill Book Co., 1988.

Hiroyasu (H.), Arai (M.)

Fuel Spray Penetration and Spray Angle of Diesel Engines
Trans. of JSAE, vol. 21, pp. 5-11, 1980.

Hiroyasu (H.), Arai (M.)

Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines
SAE Paper no. 900475, 1990.

Hiroyasu (H.)

Fundamental Spray Combustion Mechanism and Structures of Fuel Sprays in Diesel Engines
Mechanics Combustion of Droplets and Sprays, edited by Chiu (H.H.) et Chiger (N.), Begell House Inc., 1995.

Holguin (A.C.), Foster (D.E.)

Investigation of MicroFlow Machining Effects on Diesel Injector Spray Characteristics
SAE Paper no. 2004-01-0026.

Huh (K.Y.), Lee (E.)

Diesel Spray Atomization Model Considering nozzle Exit Turbulence Conditions
Atomization and Sprays, Vol; 8, pp. 453-469, 1998.

Ishikawa (S.), Ohmori (Y.), Fukushima (S.), Suzuki (T.), Takamura (A.), Kamimoto (T.)

Measurement of Rate of Multiple-Injection in CDI Diesel engines
SAE Paper no. 2000-01-1257, 2000.

Jain (A.K.)

Fundamentals of Digital Image Processing
Prentice-Hall, 1986.

Jung (D.), Assanis (D.)

Multi-Zone DI diesel Spray Combustion Model for Cycle Simulation Studies of Engine Performance and Emissions
SAE Paper no. 2001-01-1246, 2001.

Kapur (J.N.), Sahoo (P.K.), Wong (A. K. C.),

A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram
Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 29, pp. 273-385, 1985.

Ko (K.), Arai (M.)

Diesel Spray Impinging on a Flat Wall Part II : Volume and Average Air – Fuel Ratio of an Impingement Diesel Spray
Atomization and Sprays, vol. 12, pp. 753-768, 2002.

Kuniyoshi (H.), Tanabe (H.), Sato (G.T.), Fujimoto (H.)

Investigation on the Characteristics of Diesel Fuel Spray
SAE paper no. 800968, 1980.

Lai (M.C.), Wang (T.C.T.), Xie (X.), Han (J.-S.), Henein (N.), Schwarz (E.), Bryzik (W.)

Microscopic Characterization of Diesel Sprays at VCO Nozzle Exit
SAE Paper no. 982542, 1998.

Lam (L.)

Thinning Methodologies - A Comprehensive Survey
IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI 14 9, 1992.

Lefebvre (H.)

Atomization and Sprays
Hemisphere Publ. Corp., New York, ISBN : 0-89116-603-3, 1989.

Levich (V. G.)

Physicochemical Hydrodynamics

Pentice-Hall Inc., Englewood cliffs, New Jersey, pp. 639 – 650, 1962.

Lin (J.)

Divergence Measures based on the Shannon Entropy

IEEE Transactions of Information Theory, 37 1, pp. 145-150, 1991.

Lindeberg (T.)

Edge detection and ridge detection with automatic scale selection.

International Journal of Computer Vision 30: 117-154, 1998.

Luque Escamilla (P. L.), Gomez Lopera (J.F.), Martinez Aroza (J.), Seneschal (J.), Román Roldán (R.)

Método de detección de bordes entrópico aplicado al diseño de inyección de chorros Diesel

Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica 2002, Cadiz, Spain, december 2002.

Luque Escamilla (P. L.), Seneschal (J.), Gomez Lopera (J.F.), Ducottet (C.), Martinez Aroza (J.), Champoussin (J. C.)

Characterisation of High Pressure Diesel Fuel Sprays By Entropic Edge Detection

ILASS EUROPE 2002, Zaragoza, SPAIN, September 2002.

Mahr (B.)

Future and Potential of Diesel Injection Systems

THIESEL 2002, Valence, Espagne, 2002.

Marcic (M.)

A New Method for Measuring Fuel-Injection Rate

SAE Paper no. 980804, 1998.

Marcic (M.), Kovacic (Z.)

Computer Simulation of the Fuel Injection System

SAE paper no. 851583, 1985.

Matheron (G.)

Eléments pour une Théorie des Milieux Poreux

Masson, 1967.

Matsuoka (S.) Yokota (K.), Kamimoto (T.), Igoshi (M.)

A Study of Fuel Injection Systems in Diesel Engines

SAE paper no. 760551, 1976.

Maunoury (B.)

Etude Expérimentale de l'Injection et de la Combustion dans un Moteur Diesel

Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, 2001

Morgan (R.), Wray (J.), Kennaird (D.A.), Crua (C.), Heikal (M.)

The Influence of Injector Parameters on the Formation and Break Up of a Diesel Spray.

2001 SAE Transactions – Journal of Engines, 110(3), pp. 389-399, 2001.

Murata (S.), Hidaka (N.)

Evaluation of the Accuracy of the Particule Displacement Measurement Based on Digital Holography

The fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference, pp : 1 – 5, Nagoya, Japan, 2002.

Murata (S.), Yasuda (N.)

Potential of Digital Holography in Particle Measurement

Optics & Laser Technology, Vol. 32, pp : 567-574, 2000.

Naber (J.), Siebers (D.L)

Effect of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays

SAE paper no. 960034, 1996.

Nishida (K.), Murakami (H.), Hiroyasu (H.)

A Pulsed-Laser Holography Study of the Evaporating Diesel Spray in a High Pressure Bomb

Proceedings of Internal Symposium on diagnostics and Modeling of Combustion in Reciprocating Engines, Tokyo, pp. 141-148, September 1985.

Nishida (K.), Murakami (H.), Hiroyasu (H.)

Holographic Measurement of the Evaporating Diesel Spray in a High Pressure and Temperature Bomb

JSME International Journal Vol. 30, no. 59, pp. 107-115, 1987.

Otsu (N.)

A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms

IEEE Trans. Syst. Man Cyber. SMC 0, pp. 62-66, 1979.

Payri (F.), Desantes (J. M.), Arrègle (J.)

Characterization of D.I. Diesel Spray in High Density Conditions

SAE paper no. 960774, 1996.

Pal (N.R.), Pal (S.K.)

A Review on Image Segmentation Techniques

Pattern Recognition, 26, 1277 – 1294, 1993

Pan (G.), Meng (H.)

Digital Holography of Particles Fields : Reconstruction by se of Complex Amplitude

Applied Optics, 42, pp : 827 – 833, 2003.

Park (D.J.), Nam (K.M.), Park (R.H.)

Edge-Detection in Noisy Images Based on the Co-Occurrence Matrix

Pattern Recognition Letters 27 (6), pp. 765-775, 1994.

Pastor (J. V.), Arrègle (J.), Palomares (A.)

Diesel Spray Image Segmentation with a Likelihood Ratio Test

Applied Optics, 40, 17, pp. 2876 - 2885, June 2001.

Payri (F.), Desantes (J.M.), Arrègle (J.)

Characterization of D.I. Diesel Sprays in High Density Conditions

SAE paper no. 960774, 1996.

Potz (D.), Christ (W.), Dittus (B.)

Diesel Nozzle – The Determining Interface Between Injection System and Combustion Chamber

THIESEL 2000, Valence, Espagne, 2000.

Pratt (W.K.)

Digital Image Processing

John Wiley & Sons, Interscience, 1994.

Pun (T.)

A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram

Signal Process. 2, pp : 223-237, 1980.

Reitz (R.D.), Bracco (F.V.)

Mechanism of Atomization of a Liquid Jet

Phys. Fluids, vol. 25, pp. 1730-1742, 1982.

Rizk (N.K.), Lefebvre (A.H.)

Prediction of Velocity Coefficient and Spray Cone Angle for Simple Swirl Atomizers

Proceedings of the 3rd International Conference on Liquid Atomization and Sprays Systems, London, 1985.

Rodriguez-Anton (L.M.), Casanova-Kindelan (J.), Tardajos (G.)

High Pressure Physical Properties of Fluids used in Diesel Injection Systems

SAE paper no. 2000-01-2046, 2000.

Schil (P.), Bryzik (W.), Atreya (A.)

Analysis of Current Spray Penetration Models and Proposal of a Phenomenological Cone Penetration Model

SAE Paper no. 960773, 1996.

Schmidt (F.)

Innovative Instrument for Very High Accuracy Measurement of Shot to Shot Flow and Rate of Automotive Injection Systems sing Gasoline or Fuel at Low or High Pressure

JSAE Paper no. 200225361, 2002.

Schwarz (V.), König (G.)

Influence of the Injector Control on Spray Propagation, Mixture Formation and Combustion of Heavy-duty Diesel Engines

IMechE Seminar Publication "Fuel Injection Systems", Paper S492/S3/99, London, 1999.

Serra (J.)

Introduction à la Morphologie Mathématique

Cahier du Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique, Ecole des Mines, Fontainebleau, 1969.

Serra (J.)

Image Analysis and Mathematical Morphology

New York Academic, 1982.

Shannon (C.), Weaver (W.)

The Mathematical Theory of Communication

Bell System Technical, Journal, vol. 27, pp. 379 - 423, 623 - 656, 1948.

Shmid (U.), Krötz (G.), Öing (H.), Renner (G.), Dschimtt-Landsiedel (H.)

A Flow Sensor for Harsh Environmental Automotive Applications

10th Int. Conf. sensor, Vol. 1, Nuremberg, Germany, 2001.

Sirignano (W.A.)

Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays

Cambridge University Press, Cambridge, ISBN : 0-521-63036-3, 1999

Sobel (D.R.), Lehrach (R.P.C.)

A Hydro-Mechanical Simulation of Diesel Fuel Injection Systems

SAE paper no. 870432, 1987.

Soteriou (C.), Andrews (R.), Smith (M.)

Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization

SAE paper no. 950080, 1995.

Stegemann (J.), Seebode (J.), Baltes (J.), Baumgarten (C.), Merker (G.P.)

Influence of Throttle Effects at the Needle Seat on the Spray Characteristics of Multihole Injection Nozzle

ILASS'02, Zaragoza, 9-11 September, 2002.

Tabata (M.), Fujii (H.), Arai (M.), Hiroyasu (H.)

Mean Drop Diameter of a Diesel Spray in a Vaporizing Process

JSME International Journal Series II, Vol. 34, o. 3, 1990.

Varde (K.S.)

Compressibility of Diesel and Methanol Fuels at Low Temperatures

SAE paper no 890055, 1989.

Verhoeven (D.), Vanhemelryck (J.L.), Baritaud (T.)

Macroscopic and Ignition Characteristics of High-Pressure Sprays of Single-Component Fuels

SAE paper no 981069.

Wakuri (Y.), Fujii (M.), Amitani (T.), Santavicca (R.L.), Bracco (F.V.)

Studies of the Penetrations of a Fuel Spray in a Diesel Engine

Bull. J.S.M.E. 3(9), pp 123 – 130, 1960.

Wang (X.F.), Lefebvre (A.H.)

unpublished work, 1986

Yamaoka (K.), Saito (A.), Abe (N.) Okazaki (M.)

Analysis of Bypass Control Fuel Injection Systems for Small Diesel Engines by Digital Computer

SAE paper no. 730664, 1973.

Yon (J.)

Jet Diesel Haute Pression en Champ Proche et Lointain : Etude par Imagerie
Thèse de doctorat, Université de Rouen, 2003.

Yule (A. J.), Mirza (M. R.), Filipovic (U.)

Correlations for Diesel Spray Penetration Including the Effect of the Break-Up zone
ICLASS-91, pp267-274, Gauthersberg, 1991.

Annexes

Annexe 1 : Composant du système Common Rail

Cette annexe a été réalisée d'après des documentations Bosch, 1999.

Les composants du système CR sont :

- La pompe de pré-alimentation
- La pompe haute pression
- L'accumulateur haute pression (rail)
- L'électrovanne de régulation
- L'injecteur
- L'électronique de commande

Un résumé du principe de fonctionnement de l'électro-injecteur a été présenté au chapitre 1. Dans cette annexe, nous présentons la construction et le fonctionnement de la pompe de pré-alimentation, de la pompe haute pression et de l'électrovanne de régulation de notre système et de l'électro-injecteur. A noter qu'il existe des variantes de chaque composant que nous ne présentons pas dans cette annexe.

Pompe de pré-alimentation

La pompe de pré-alimentation sert à refouler le carburant du réservoir à la pompe à haute pression. A cet effet, on utilise, en général, une pompe électrique à carburant EKP montée sur le circuit entre le réservoir et le filtre.

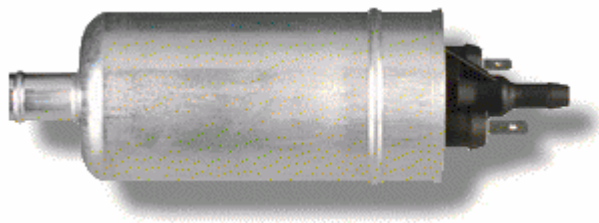


Figure A1-1 : Pompe électrique EKP.

La pompe électrique (EKP) comprend un moteur électrique (Figure A1-2, composant 1) et un élément de pompe (pompe cellulaire à rouleaux, Figure A1-2, composant 2). Elle est refroidie par le carburant qui parvient au raccord de refoulement (Figure A1-2, composant 3) par une soupape anti-retour (Figure A1-2, composant 4).

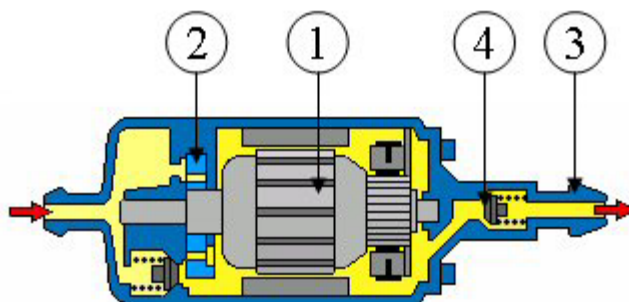


Figure A1-2 : Composants de la pompe EKP.

La pompe cellulaire à rouleaux est entraînée par le moteur électrique. Le disque du rotor (Figure A1-3, composant 1) est monté excentriquement et a des rainures dans lesquelles les rouleaux (Figure A1-3, composant 2) se trouvent guidés librement. Le carburant sort par une ouverture en forme de « haricot », sur le côté aspiration (Figure A1-3, composant 3) dans la chambre, entre la plaque du fond et le rouleau. Comme les rouleaux sont pressés contre la plaque du fond par la rotation et la pression du carburant, ce dernier est refoulé du côté refoulement (Figure A1-3, composant 4) vers l'ouverture d'échappement.

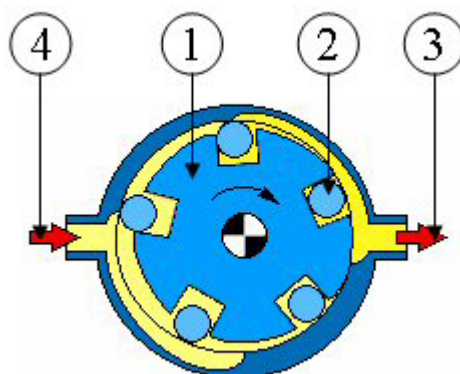


Figure A1-3 : Fonctionnement de la pompe EKP.

Pompe haute pression

La pompe haute pression (Figure A1-4) a pour fonction d'engendrer la haute pression nécessaire à l'injection et de refouler un débit suffisant de carburant quelles que soient les conditions d'injection.

La pompe haute pression est une pompe à pistons radiaux (Figure A1-5, composant 1). Sur l'arbre d'entraînement (Figure A1-5, composant 2), un excentrique (Figure A1-5, composant 3) commande successivement les trois pistons. Les pistons sont maintenus sur l'excentrique par des ressorts, et chaque piston aspire le carburant à travers un clapet d'aspiration (Figure A1-5, composant 4) correspondant. Le carburant admis par le piston est refoulé à travers un

clapet de refoulement (Figure A1-5, composant 5) vers le rail. L'électrovanne de régulation (Figure A1-5, composant 6) renvoie une partie de ce carburant vers le circuit basse pression. La faible excentricité sur l'arbre ainsi que la disposition symétrique des pistons contribuent à une faible oscillation de pression dans le rail. Le clapet d'aspiration d'un piston peut être maintenu ouvert par un solénoïde (Figure A1-6). Grâce à cela, nous avons un meilleur rendement et le débit de carburant de la pompe haute pression peut être adapté à la demande. Une vanne de sécurité est positionnée à l'alimentation de la pompe haute pression. Le piston de cette vanne ferme un orifice à l'entrée de la pompe haute pression si la pression de gavage est faible. Pour une pression plus forte cet orifice est ouvert.

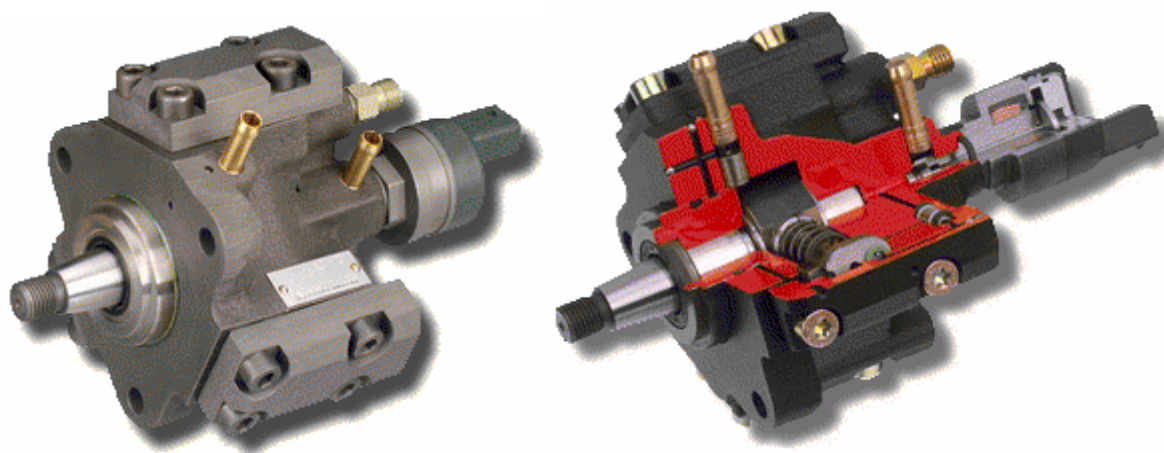


Figure A1-4 : Pompe haute pression.

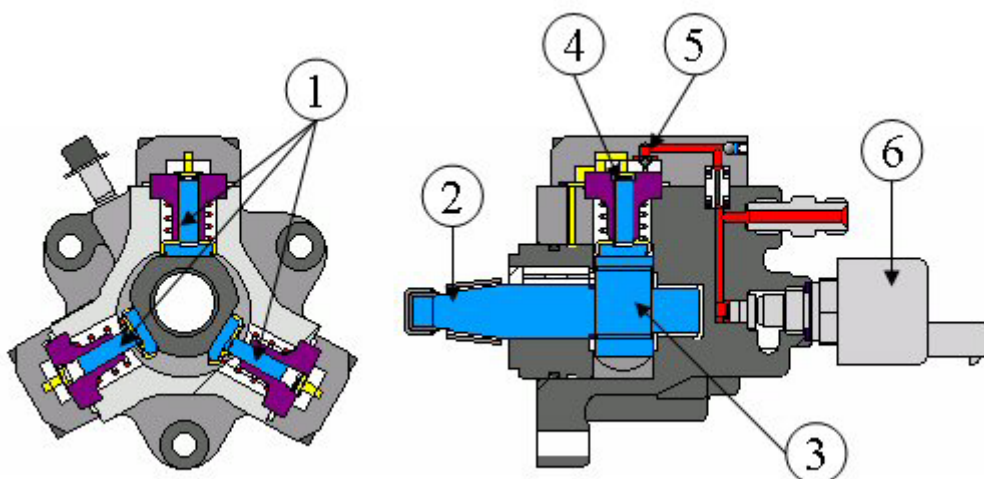


Figure A1-5 : Construction de la Pompe haute pression.

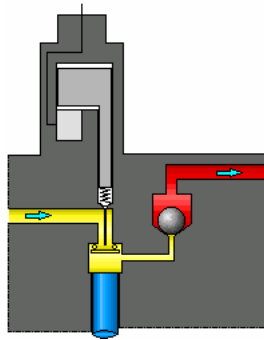


Figure A1-6 : Solénoïde du clapet d'aspiration.

Electrovanne de régulation

L'électrovanne de régulation (Figure A1-7) est pilotée par une électronique qui assure la stabilisation de la haute pression dans l'accumulateur. Elle est montée directement sur la pompe haute pression. Elle comporte un induit (Figure A1-7, composant 1), un électro-aimant (Figure A1-7, composant 2), une soupape à bille (Figure A1-7, composant 3) et un ressort (Figure A1-7, composant 4) qui presse la bille sur son siège contre l'alimentation en haute pression (Figure A1-7, composant 5) ; L'électro-aimant peut exercer une force supplémentaire sur la bille par l'induit. Cette force exercée par l'électro-aimant dépend du courant de pilotage. Ce dernier est créé suivant un rapport cyclique (modulation d'impulsions en largeur). Ainsi la pression dans le rail dépend du rapport cyclique d'ouverture de la soupape à bille.

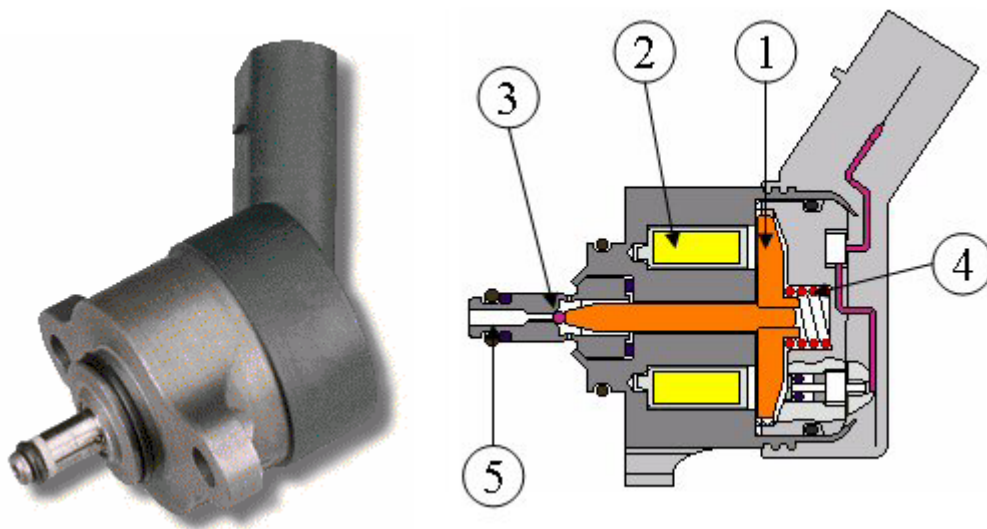


Figure A1-7 : Electrovanne de régulation de la pression.

Electro-injecteur

Pour une pression rail donnée, l'ouverture et la fermeture de l'aiguille de l'injecteur résultent des forces suivantes (Figure A1-8) :

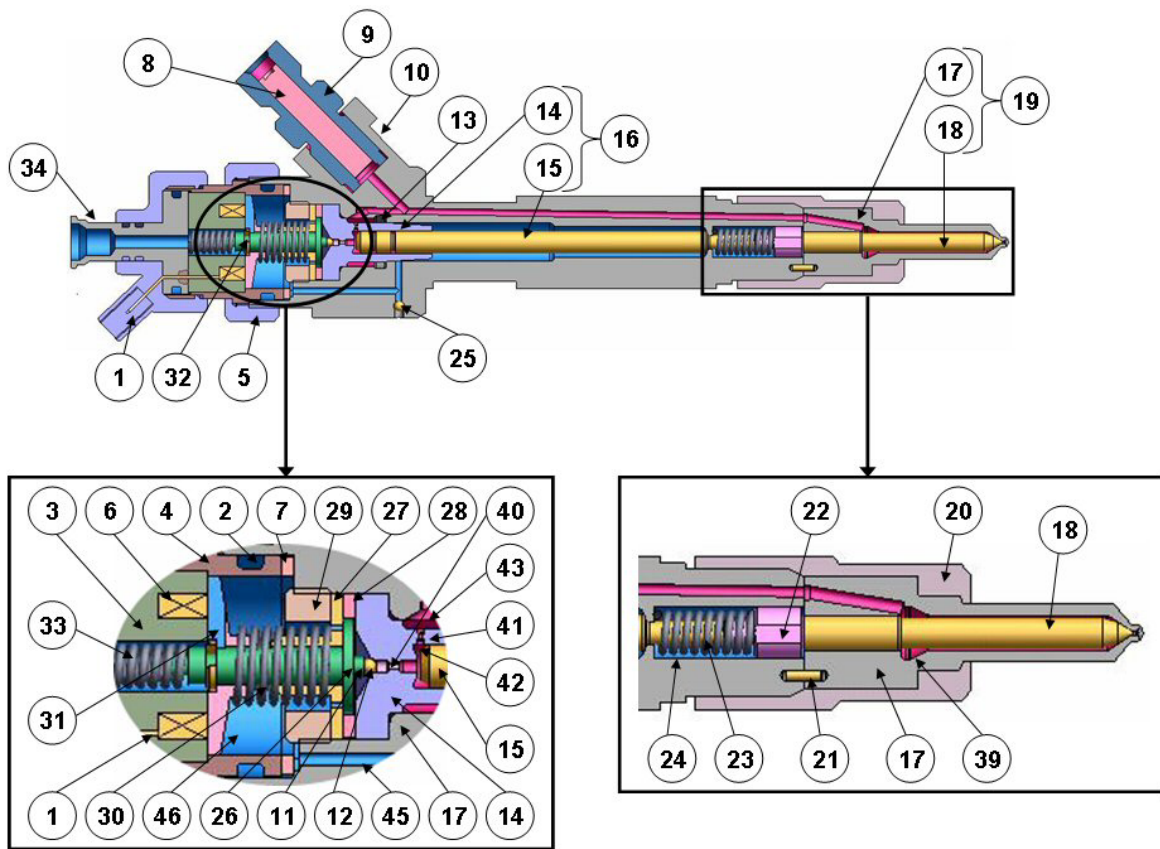
- Force mécanique du ressort d'appui : le ressort d'appui (23) presse l'aiguille contre son siège. Ceci assure l'étanchéité de l'injecteur et empêche le carburant de s'échapper dans l'espace.
- Force mécanique du ressort de la vanne : le ressort de la vanne (33) presse la bille (12) contre son siège permettant de boucher le gicleur d'ouverture de l'injecteur (40). Ainsi, le carburant ne peut pas s'échapper de la chambre de commande (42) vers le circuit de retour (34).
- Force électromagnétique de l'électro-aimant : quand la bobine magnétique (6) n'est pas pilotée, elle n'exerce pas de force. Mais quand elle est pilotée, sa force suffit à vaincre la force du ressort de la vanne (33) et à sortir la bille (12) de son siège. C'est la force décisive pour le début de l'injection.
- Force hydraulique de pression dans la chambre de commande : à partir de la pression dans la chambre (42), une force est exercée sur le piston de commande (15). Cette force s'ajoute à la force du ressort d'appui (23).
- Force hydraulique de pression sur l'aiguille : à partir de la pression dans le volume de la chambre (39), il résulte une pression sur l'aiguille (18) par suite de la légère pente en biais.

Au repos, les forces sont en équilibre, l'aiguille obture le passage au niveau de son siège, le ressort de la vanne (33) presse la bille (12) contre son siège.

L'ouverture de l'aiguille (18) est amorcée par le pilotage de la bobine magnétique (6) qui permet de soulever la bille (12) de son siège par la force supplémentaire. Le carburant de la chambre de commande (42) s'écoule par le gicleur d'ouverture de l'injecteur et par l'orifice de retour du carburant (34) et revient au réservoir. Par suite, la pression dans la chambre de commande (42) baisse et la force exercée sur le piston (15) diminue. La pression sur l'aiguille de la buse reste quasiment inchangée grâce au gicleur de réalimentation. La force résultante de cette pression dans la chambre (39) est suffisamment importante pour soulever l'aiguille (18) et par suite pour déclencher l'injection. Le courant de pilotage de la bobine magnétique (6) est abaissé en quelques millisecondes d'un courant de traction élevé (d'environ 20A) à un courant de maintien réduit (d'environ 12A) permettant à l'aiguille (18) d'atteindre son ouverture complète.

Pour terminer l'injection, la bobine magnétique (6) est mise hors tension. Le ressort de la vanne (33) presse de nouveau la bille (12) contre son siège ; dans la chambre de commande

(43), la même pression est de nouveau engendrée comme sur l'aiguille. La force sur le piston redevient plus grande permettant la fermeture de l'aiguille et la remise des forces en équilibre.



- 1- Connexion électrique 2- Joint torique 3- Noyau magnétique 4- Douille 5- Erou de serrage de l'aimant
6- Bobine magnétique 7- Bague de réglage 8- Filtre crayon 9- Raccord haute pression 10- Rondelle d'étanchéité 11- Guide de bille 12- Bille de vanne 13- Bague d'étanchéité 14- Élément de vanne 15- Piston de commande 16- Garniture de vanne 17- Corps d'injecteur 18- Aiguille 19- Injecteur 20- Erou de serrage de l'injecteur 21- Goupille de serrage spirale 22- Pièce de pression 23- Ressort d'appui 24- Rondelle de compression 25- Bille 26- Axe d'induit 27- Rondelle d'induit 28- Bague de réglage 29- Vis de serrage 30- Ressort d'induit 31- Plateau d'induit 32- Rondelle de sécurité 33- Ressort de vanne 34- Conduite de retour de carburant 39- Chambre 40- Gicleur d'ouverture de l'injecteur 41- Gicleur de réalimentation 42- Chambre de commande 43- Raccord haute pression

Figure A1-8 :Principe de fonctionnement de l'électro-injecteur.

Annexe 2 : Les buses d'injection

Les techniques d'injection diesel connaissent depuis quelques années une réelle révolution. L'apparition sur le segment des voitures particulières de l'injection directe haute pression a permis le développement de nouvelles techniques, motivées par l'avènement de normes d'émission plus sévères et par les exigences de la clientèle. Dans le cadre des équipements liés à l'injection à rampe commune, le porte injecteur et le nez d'injecteur ont dû être adaptés pour pulvériser au mieux le gasoil et limiter les dispersions jet à jet et cycle à cycle. Ces fluctuations incontrôlées étant des sources de formation de polluants, et de surconsommation.

Double guidage

Les aiguilles des injecteurs sont désormais à double guidage. La levée est mieux maîtrisée, par l'intermédiaire d'un meilleur suivi de l'axe théorique du mouvement de l'aiguille. Les efforts qu'elle subit au cours de l'injection sont mieux répartis. De plus, en étant guidée à deux endroits de sa course, ses vibrations sont limitées. Les jets sont alors plus reproductibles cycle à cycle, et ont chacun un débit plus constant au cours de la vie du système d'injection.

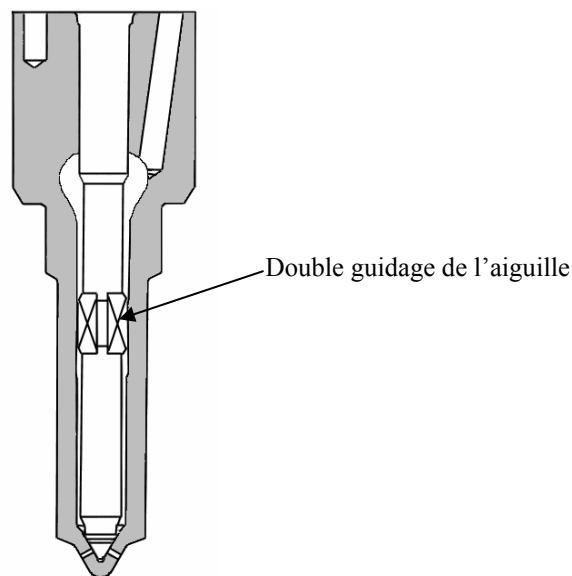


Figure A2- 1: Double guidage de l'aiguille.

Injecteur à sac/ Injecteur VCO

Du point de vue de la sensibilité aux émissions normalisées, les équipementiers d'injection haute pression diesel ont beaucoup travaillé sur la définition du petit volume mort, appelé « sac », présent à la base de l'aiguille quand elle repose sur son siège.

L'augmentation de la contenance de ce « sac » dégrade les émissions d'hydrocarbures imbrûlés. En effet, lors de la fin de l'injection, lorsque l'aiguille est retombée, ce volume se déverse dans le cylindre à faible pression d'injection. Cette fraction de carburant brûle très lentement et de manière incomplète. Par contre, si son volume est trop réduit, l'aiguille vient obstruer l'orifice débitant. On emploie alors le terme de VCO pour Valve Covered Orifice.

Dans ce cas, pour des décharges faibles et moyenne, l'aiguille n'est que partiellement levée. Les jets deviennent très dissymétriques, induisant une forte augmentation de l'émission de particules à l'échappement. En effet la répartition du carburant dans la chambre étant changée, des zones très riches apparaissent favorisant la formation de suies.

Différents compromis sont alors proposés, regroupés sous la terminologie de mini et micro-sac suivant l'importance en volume de ce dernier. Son augmentation tend à limiter l'émission de suies à charges partielles, mais augmente le niveau d'imbrûlés émis.

Actuellement sur le marché, tous les moteurs de cylindrée unitaire inférieure ou égale à 500 cm³ sont munis d'injecteurs de type VCO.

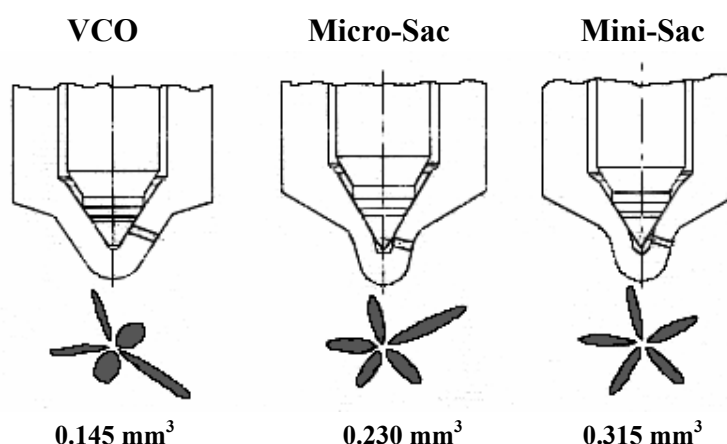


Figure A2- 2 : Comparaison des architectures en VCO, Micro-Sac ou Mini-Sac. Un ordre de grandeur du volume du sac (orifice débitants compris, soit $\sim 0.088 \text{ mm}^3$) et de la symétrie moyenne des sprays sont respectivement indiqués (d'après Potz et *al.*, 2000).

Facteur k : buses à profil conique

Les progrès en terme d'usinage de buses ont par ailleurs permis une réduction du diamètre de chaque orifice, et une meilleure qualité de fabrication. Les diamètres courants sont maintenant de 160 μm alors qu'en 1997 les buses de 200 μm n'étaient encore que des prototypes. La réduction de la section de passage et l'augmentation de la pression d'injection sont en effet deux principaux facteurs intervenant en faveur d'une meilleure pulvérisation des sprays dans la chambre de combustion.

Afin de garantir une bonne perméabilité du nez d'injecteur, c'est-à-dire une bonne faculté à injecter une grande quantité de gasoil en un temps donné, il a fallu limiter les phénomènes de cavitation, et de pertes de charge en général, à l'intérieur de la buse. De nouveaux injecteurs ont alors fait leur apparition, dotés de buses à profil conique, quantifié par le facteur « k ». Le canal a une section qui se rétrécit vers la chambre de combustion. De cette manière, les pertes de charge au niveau du corps du nez d'injecteur sont limitées, et la cavitation minimisée. Cependant cette géométrie est très sensible à l'encrassement des orifices débitants.

L'usinage est effectué par des décharges électriques (EDM pour Electro Discharge Machining), ce qui permet une bonne finition et une précision de l'ordre du micron. La buse ainsi usinée est ensuite hydro-érodée (HE) afin d'affiner son débit théorique et la tolérance admise en réduisant les angles vifs. Potz et al (2000) annoncent $\pm 2\%$ d'erreur sur les valeurs de débit par rapport à la consigne.

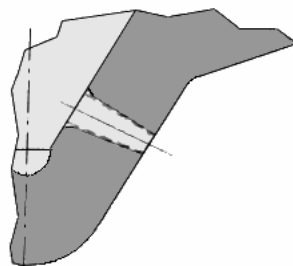


Figure A2- 3 : Concept de buse à facteur K. En pointillé : après EDM, en traits pleins : après EH.

Siège ZHI

L'avènement de l'électronique de puissance dans le pilotage des injecteurs a permis le développement de stratégies nouvelles d'injection. Il est désormais courant d'avoir trois phases successives d'introduction de la charge dans la chambre de combustion voir plus, qualifiées respectivement d'injection pilote, d'injection principale et de post-injection. Les quantités injectées pour une unique commande d'injecteur ont ainsi tendance à diminuer. Ceci nécessite par conséquent une maîtrise accrue des débits injectés pour les faibles levées.

Par ailleurs, de nouvelles forme de sièges ont alors fait leur apparition tolérant mieux les déformations du corps de l'injecteur face aux forts gradients de pressions subis lors d'une injection. De cette manière, les faibles levées sont mieux pilotées, le siège étant toujours d'une forme optimale (Potz et *al.* 2000).

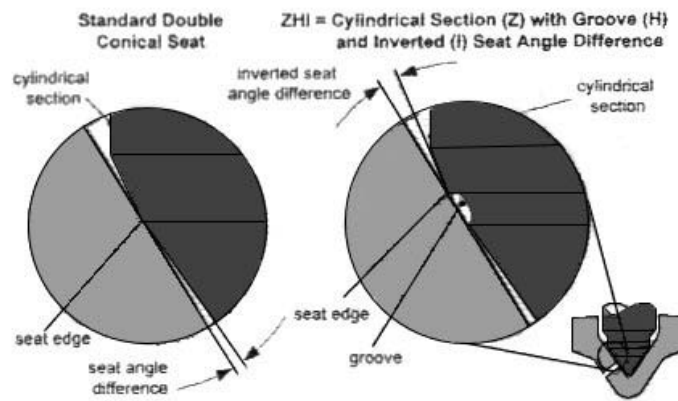


Figure A2- 4 : Comparaison entre un siège standard à double conicité (à gauche) et un profil ZHI (à droite) (d'après Potz et *al.*, 2000).

Annexe 3 : Détermination du coefficient de décharge d'un injecteur

Le coefficient de décharge des orifices d'injection est défini par les pertes de charge produites dans l'injecteur et par la section effective de l'écoulement dans les orifices d'injection. Dan et al. en partant de la définition de Heywood, 1988, donne la relation suivante pour obtenir le coefficient de décharge d'un trou, il est lié au débit massique par l'équation suivante :

$$C_d = \left[\dot{m}_i / (\rho_l t_{inj}) \right] / \left[(\pi d_{inj}^2 / 4) (2\Delta P / \rho_l)^{0.5} \right]$$

La masse injectée \dot{m}_i est obtenue à partir de la cartographie de l'injecteur. Par contre la masse mesurée par l'EMI2 est la masse M_{totale} totale injectée pour l'ensemble des trous. Nous supposons que la quantité injectée est équivalente pour chaque trou et par conséquent $\dot{m}_i = M_{totale} / nb_{trous}$.

La mesure du coefficient de décharge est obtenue de façon moyenne. Nous utilisons divers pressions d'injection : 60, 80, 100 et 120 MPa et différentes durées d'injection.

Pour l'injecteur 1, on obtient un coefficient de décharge de 0.5. Pour l'injecteur 2, le coefficient de décharge est plus grand et égal à 0.58.

Il est à noter que le coefficient de décharge diminue quand la durée d'injection augmente pour une pression donnée mais également diminue quand la pression d'injection augmente pour une durée d'injection fixée.

Annexe 4 : Caractéristiques des injecteurs utilisés

Nous utilisons deux types d'injecteurs de marques différentes. Ces deux injecteurs que nous appellerons 1 et 2 ont un nombre de trous et un angle de nappe différent.

Un résumé des paramètres des injecteurs utilisé est donné dans le tableau suivant.

La détermination du coefficient de décharge des injecteurs est données en annexe 3.

	nb_{trous}	d_{inj}	l_{inj}	C_d
Injecteur 1	5	0.18	1	0.5
Injecteur 2	6	0.184	1	0.64

Taleau A4- 1 : Paramètres des injecteurs.

Annexe 5 : Propriété et densité de l'huile ISO 4113

L'huile que nous utilisons au cours de notre étude est le NORMAFLUID BR de Shell. Cette huile répond à la norme ISO 4113 pour les fluides de tarage injecteurs.

Composition de l'huile

L'analyse de l'huile a été faite dans le but de déterminer les composés volatils. Cette analyse a été réalisée au laboratoire SRMA.

La détermination des composés volatils de l'huile est effectuée suivant la technique d'analyse thermogravimétrique couplée à la technique chromatographique.

L'analyse thermogravimétrique consiste à prendre un échantillon de 16.14 g et de le faire monter en température de 20°C à 200°C à la vitesse de 5°C/mm puis le maintenir à 200°C pendant 10 mm après lesquelles 97% de l'huile sont piégés dans ce tube de charbon actif disposé en sortie de la chambre d'analyse. Les composés volatils piégés dans ce tube sont analysés par chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie infrarouge.

Cette analyse montre que l'huile contient une certaine quantité de gaz carbonique CO₂. Nous remarquons aussi, que 50% des composés volatils sont des hydrocarbures aliphatiques en C12 et C13. Le reste des composés volatils sont des alcanes compris entre C14 et C22, centrés en C18.

Densité de l'huile

Au cours de notre étude, nous avons besoin de connaître la densité de l'huile pour différentes pressions d'injection et de température. Ne pouvant pas mesurer directement la densité de l'huile, il nous faut la calculer grâce à des équations.

Dans la littérature, plusieurs études se sont intéressées à la densité du gazole (Yamaoka et *al.*, 1973 ; Sobel et *al.*, 1987 ; Marcic et *al.*, 1985 ; Varde 1989).

Becchi, 1971, Matsuoka et *al.*, 1976 et Dobovisek, 1984, ont constaté que le choix d'une densité de gazole constante entraîne une erreur importante sur le débit injecté. Une étude récente (Rodriguez-Anton et *al.*, 2000) a établi une loi empirique permettant le calcul de la densité de différents hydrocarbures parmi lesquels une huile normalisée répondant à la norme ISO 4113. D'après cette étude, la densité est donnée par l'expression suivante :

$$\rho(p, t) = \frac{C_1 + C_2(t-15) + C_3(t-15)^2}{1 - C_4 \ln\left(\frac{C+p}{C+0.1}\right)}$$

Où $C = C_5 e^{-C_6(t-15)}$

Pour l'huile ISO 4113, les constantes sont les suivantes :

$C_1 = 829.168$ (densité de l'huile à la pression atmosphérique p_0 et 15°C)

$C_2 = -0.72274$

$C_3 = 5.824 \cdot 10^{-4}$

$C_4 = 8.532 \cdot 10^{-2}$

$C_5 = 117.4831$

$C_6 = 5.532 \cdot 10^{-3}$

Les auteurs garantissent un écart type entre la mesure et leur modèle inférieur à 0.23 %. La densité de l'huile ISO 4113 résultant de l'équation précédente est tracée sur la Figure A5- 1 en fonction de la pression à différentes températures. Sur cette figure, on voit bien que la densité augmente avec l'augmentation de la pression et avec la diminution de la température.

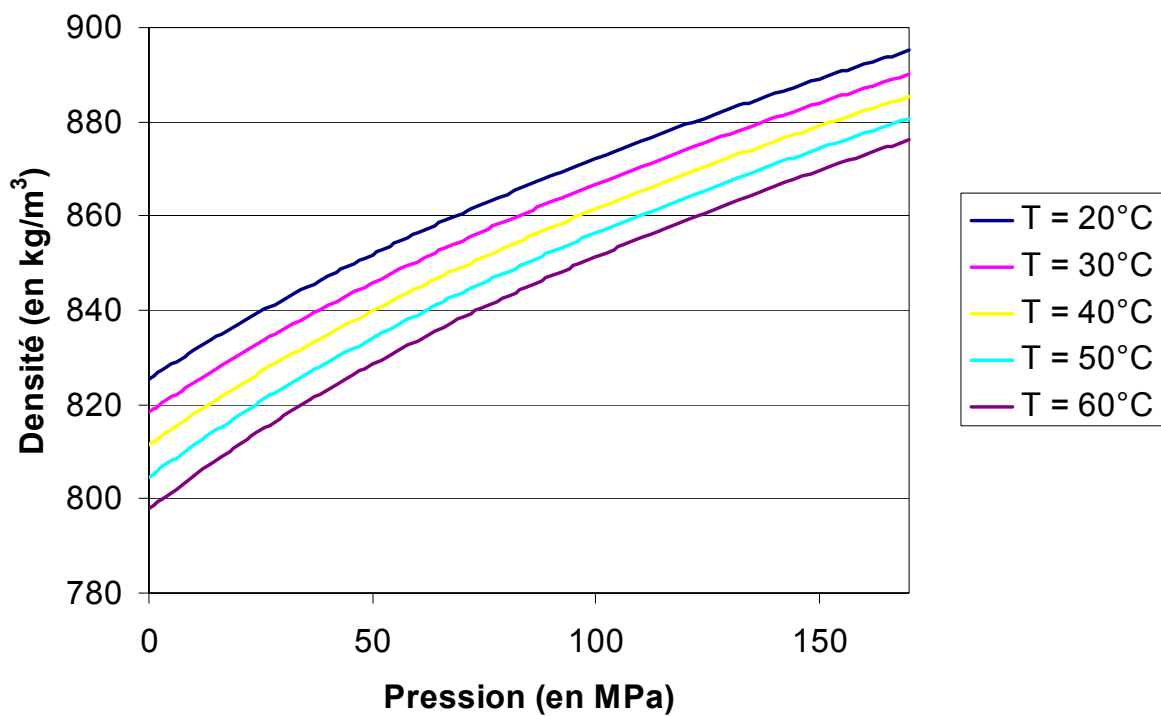


Figure A5- 1 : Densité de l'huile ISO 4113 en fonction de la pression (Rodriguez-Anton et *al.*, 2000).

Viscosité de l'huile

La viscosité est fortement affectée par la température et la pression de l'huile (Rodriguez-Anton et *al.* 2000). Dans cette étude, pour le calcul de la viscosité, nous avons adopté des expressions mathématiques et des modèles empiriques établis par des études antérieures.

Kouzel, 1965, propose une expression de la viscosité dynamique garantissant une erreur inférieure à 8 % pour des pressions atteignant 70 MPa :

$$\mu(p, t) = \mu_0(p_0, t) \exp\left(\frac{p}{10^4} (7.918 + 37.27967 \mu_0^{0.278})\right) \quad (2)$$

Où μ_0 représente la viscosité dynamique à pression atmosphérique p_0 et à la température t

Rodriguez-Anton et *al.*, 2000, ont établi une expression empirique de la viscosité cinématique, à pression atmosphérique p_0 , en fonction de la température :

$$\nu_0(p_0, t) = C_1 (t + C_2)^{-1.85} \quad (3)$$

Pour l'huile ISO 4113, les constantes sont les suivantes :

$$C_1 = 0.01322$$

$$C_2 = 62.2$$

Les auteurs estiment une erreur inférieure à 1.05%

Les viscosités cinématiques et dynamiques sont liées par l'équation suivante :

$$\nu(p, t) = \frac{\mu(p, t)}{\rho(p, t)} \quad (4)$$

Avec (3) et (4), on obtient

$$\mu_0(p_0, t) = C_1 \rho_0(p_0, t) (t + C_2)^{-1.85} \quad (5)$$

$$\nu(p, t) = \frac{C_1 \rho_0(p_0, t) (t + C_2)^{-1.85}}{\rho(p, t)} \exp\left(\frac{p}{10^4} (7.9718 + 37.27967 \mu_0^{0.278})\right) \quad (6)$$

$\rho_0(p_0, t)$ et $\rho(p, t)$ sont calculées d'après l'équation (1)

La viscosité cinématique de l'huile ISO 4113 résultant de l'équation (6) est tracée sur la figure suivante en fonction de la pression à différentes températures. Sur cette figure, on voit bien que cette viscosité augmente avec l'augmentation de la pression et avec la diminution de la température.

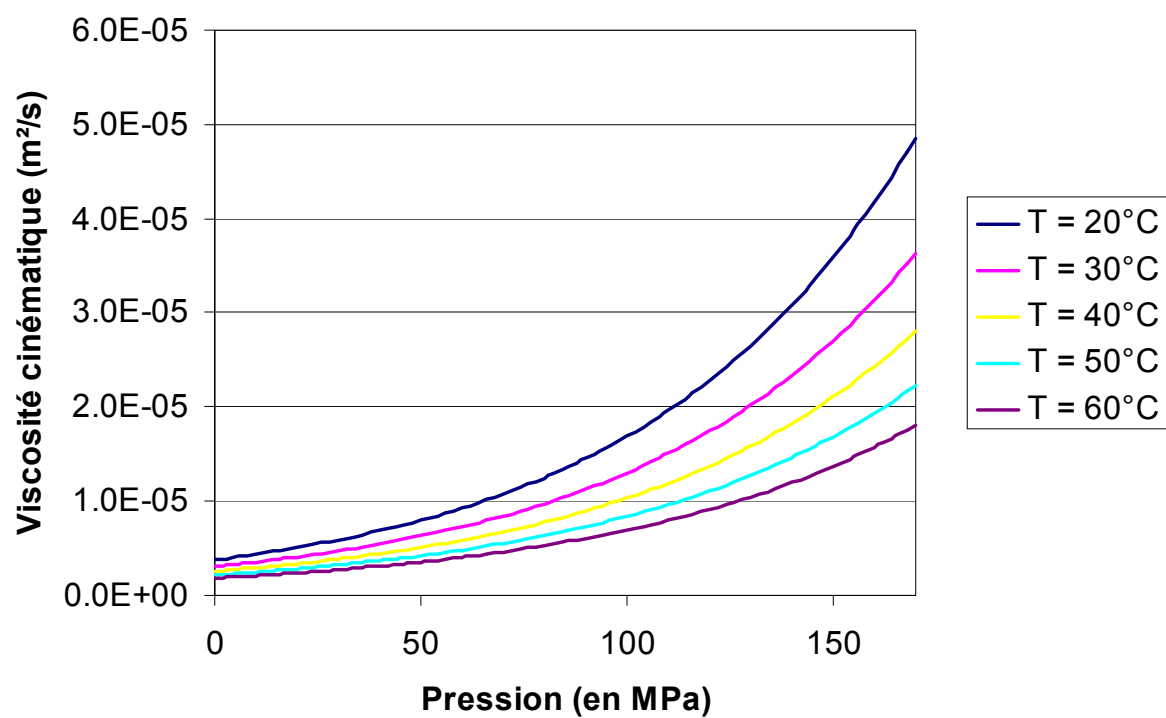


Figure A5- 2 : Viscosité cinématique de l'huile en fonction de la pression et de la température.

Annexe 6 : Masse volumique de l'azote et du dioxyde de carbone en fonction de la pression et de la température

L'azote (N₂) est un gaz inerte qui est très utilisé pour les systèmes en contre pression. Le dioxyde de carbone (CO₂) est utilisé de manière moins systématique. Son avantage est d'avoir une densité plus grande que l'azote et donc de pouvoir réaliser des expériences à pression moins élevée. Le SF₆ est un autre gaz inerte utilisé dans le système de Payri mais son coût est relativement élevé.

Dans cette annexe, nous allons présenter l'évolution de la densité en fonction de la pression chambre et de la densité et donné deux abaques.

Nous allons supposer que ces deux gaz se comportent comme des gaz parfaits. Ils obéissent à la loi des gaz parfaits : $PV = nRT$

Définitions :

n : nombre de mole $n = \frac{m}{M}$

m : masse en g

M : masse molaire en g/mol

P : pression en Pa

V : volume en m³

R : constante des gaz parfaits $R = 8,3145 \frac{\text{Pa m}^3}{\text{mol K}}$

T : température en K

d : densité du gaz en Kg/m³

$$\text{donc } PV = \frac{m}{M}RT \text{ soit } d = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$$

Pour le CO₂ $M = 44,01 \text{ g/mol}$.

Pour le N₂, $M = 28,01 \text{ g/mol}$.

Exemple de comparaison de densité (à 21°C)

Pour une pression de 5 MPa de N₂, la densité de N₂ est de 57.292 Kg/m³. Pour avoir la même densité de CO₂, il faut monter à 3,18 MPa. Par conséquent, on constate que pour obtenir la même densité de gaz à température ambiante (21°C), il faut une pression de N₂ 1.57 fois plus grande que le CO₂.

Exemple d'évolution de la densité de N₂ et du CO₂ en fonction de la pression chambre à 21°C

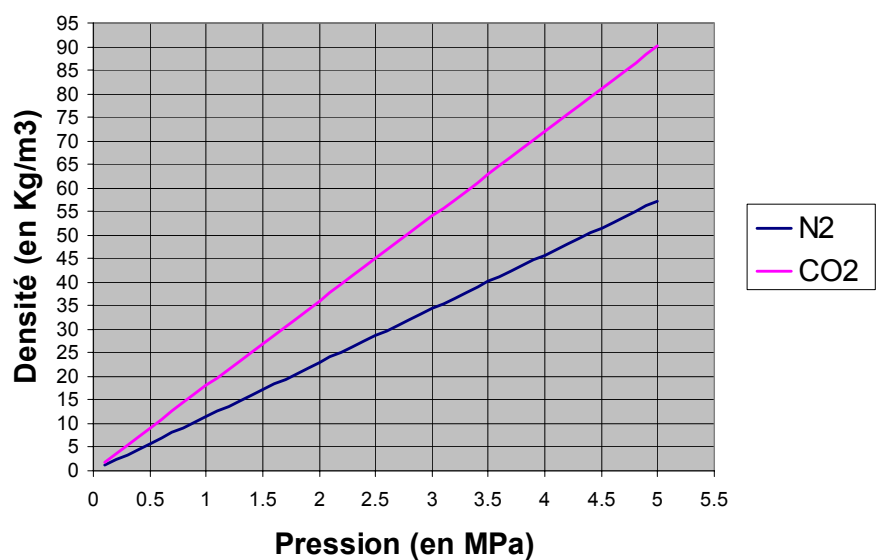


Figure A6- 1 : Variation de la densité du N₂ et CO₂ en fonction de la pression.

Annexe 7 : Détermination de la viscosité d'un gaz

Nous présentons ici la viscosité dynamique ou absolue. La viscosité dynamique est avant tout une fonction de la température.

Pour les gaz, la viscosité est calculée avec la formule de Sutherland (Crane, 1988) :

$$\mu = \mu_0 \frac{a}{b} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.5}$$

Avec

$$a = 0.555T_0 + C \text{ et } b = 0.555T + C$$

μ est la viscosité en centipoise à la température T

μ_0 est la viscosité de référence en centipoise à la température de référence T_0

T est la température en ° Rankine

T_0 est la température de référence en ° Rankine

C est la constante de Sutherland

Dans cette expression, la température est exprimée en °Rankine. La formule de conversion entre °Rankine et °Celsius est la suivante :

$$T(^{\circ}C) = 0.555556 [T(^{\circ}R) - 491.67]$$

Et la conversion de °Celsius au °Rankine est donnée par :

$$T(^{\circ}R) = 1.8T(^{\circ}C) + 491.67$$

A $T_0 = 540.99^{\circ}R$, pour l'azote, $\mu_0 = 0.01718$ centipoise

Exemple : à $50^{\circ}C$, la viscosité de l'azote est de $1.88 \cdot 10^{-5}$ Pa-s.

Annexe 8 : L'EMI2

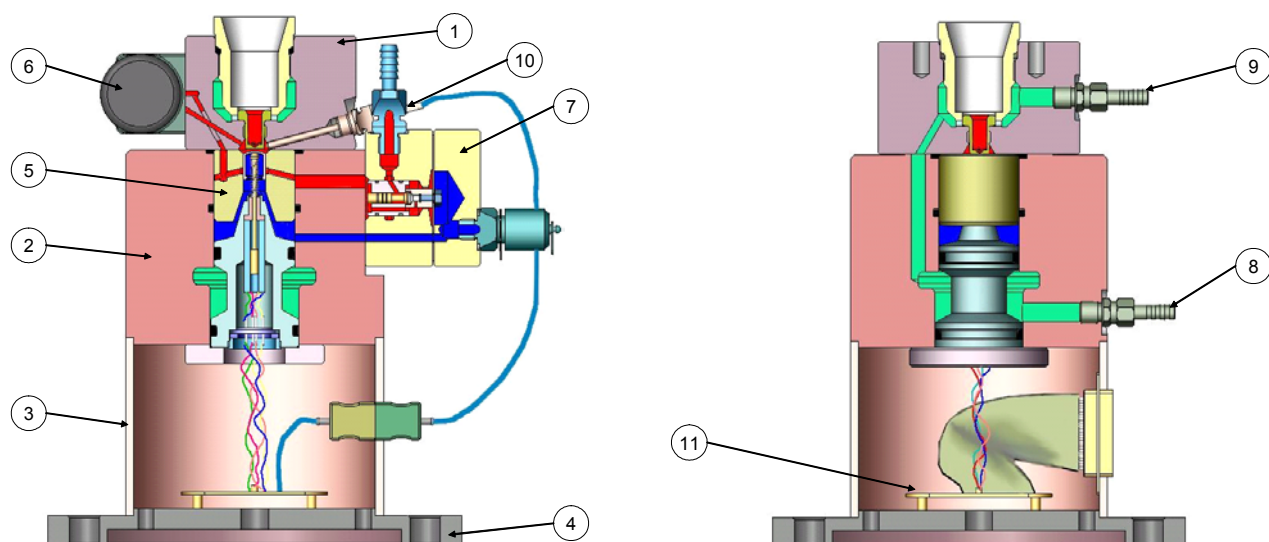
Le débitmètre EMI2 utilisé mesure des volumes instantanés d'injection coup par coup. Son principe de mesure repose sur le déplacement d'un piston relativement léger (poids 8,64 g) sous l'action du fluide injecté.

L'injecteur installé en haut de l'appareil remplit une chambre d'injection à volume variable. Tant qu'on est en phase d'injection, l'électrovanne de vidange reste fermée et le piston descend sous la poussée du fluide d'essai. La variation de la position de ce piston, mesuré par un capteur LVDT (Linear Variable Displacement Transducer), est l'image exacte du volume de fluide injecté. A l'arrêt entre deux injections, l'électrovanne de vidange s'ouvre et le piston, sous la pression d'un ressort et de la contre pression (1 – 10 MPa), refoule le fluide hors de la chambre de mesure vers l'extérieur. Le débitmètre pilote l'électrovanne de vidange de manière à ne pas vider complètement la chambre. La hauteur de fluide restant est réglable. Un volume de 425 mm³ existe entre aussi entre la sortie de l'injecteur et la chambre. Il correspond au volume interne du brise jet qui a pour rôle d'amortir les écoulements issus des orifices d'injection et d'améliorer la répartition de la pression sur le piston. La quantité injectée maximale mesurée par le débitmètre est de 600 mm³, avec une précision de ± 0.1 %.

L'EMI2 accepte des cadences d'injection de 30 à 30000 coups par minutes.

Les débits d'injection sont affichés en valeur instantanée, moyennée ou cumulée sur un nombre de coups paramétrable. Les résultats des mesures sont donnés soit en volume, soit en masse, soit en volume compensée à une température donnée.

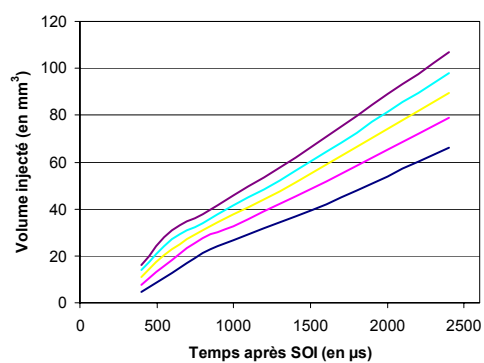
L'appareil est équipé de plusieurs sorties analogiques, parmi lesquelles une sortie analogique de la position du piston (levée de piston, en V) et une sortie analogique de la loi d'injection (dérivée du signal de levée de piston, en V).



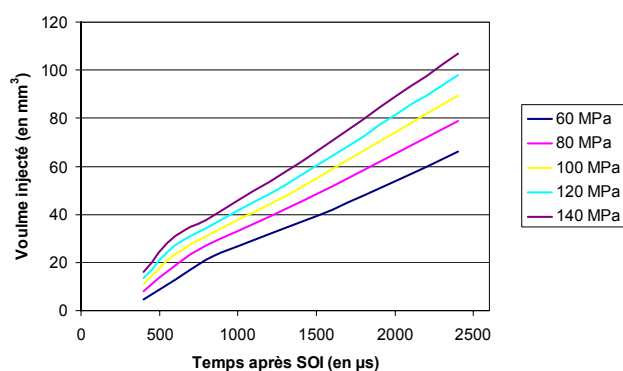
1- Corps supérieur 2- Corps 3- Tube 4- Embase 5- Piston-cylindre 6- Electrovanne 7- Ensemble soupape 8- Entrée refroidissement 9- Sortie refroidissement 10- Sonde de température 11- Carte électronique

Figure A8- 1 : Section du débitmètre EMI2.

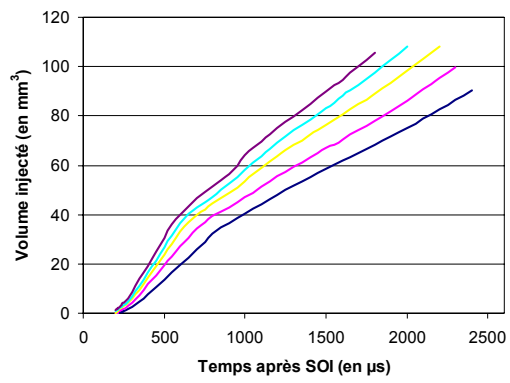
Avec cet appareil, il est possible d'obtenir une cartographie des injecteurs utilisés. C'est-à-dire connaître pour n'importe quelles pressions, la quantité de carburant injectée à chaque instant. Cette donnée intervient dans l'obtention de la richesse du mélange dans la chambre d'injection.



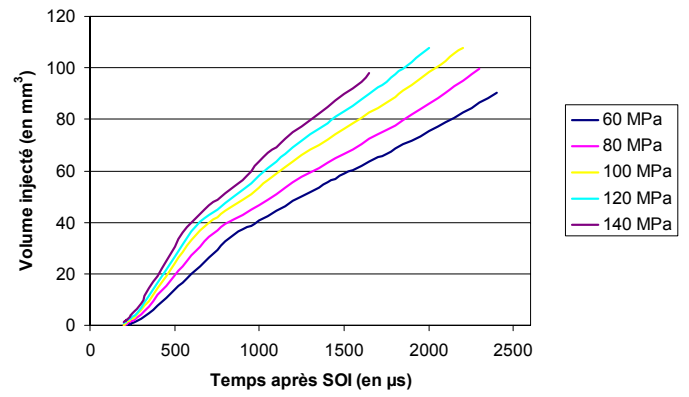
(a).



(b).



(c)



(d)

Figure A8- 2 : cartographie de l'injecteur 1 et 2, (a) Injecteur 1 CP 2.5 MPa, (b) Injecteur 1 CP 3.5 MPa, (c) Injecteur 2 CP 2.5 MPa, (d) Injecteur 2 CP 3.5 MPa.

Annexe 9 : Equation du mouvement relatif d'une particule

L'équation du mouvement relatif d'une particule sphérique, rigide et isolée dans un écoulement uniforme spatialement s'écrit dans un repère absolu :

$$m_p \left(\frac{d\vec{V}}{dt} \right)_p = \sum f_{ext}$$

Avec m_p : masse de la particule, $\left(\frac{d}{dt} \right)_p = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{grad}$: dérivée particulaire en suivant le mouvement de la particule ; $\sum f_{ext}$: résultante des forces extérieures s'exerçant sur elle.

Les forces extérieures résultent des effets suivants :

- Pesanteur et poussée d'Archimède sur la sphère :

$$f_1 = \frac{4}{3} \pi R_p^3 (\rho_p - \rho) \vec{g}$$

Avec \vec{g} : vecteur de la pesanteur ; ρ_p et ρ : masse volumique de la particule et du fluide ; R_p : rayon de la particule.

- Trainée de la sphère dans son mouvement relatif de vitesse $\vec{V}_r(t)$:

On décompose cette trainée en trois termes :

- un terme de trainée en translation rectiligne uniforme

$$6\mu\pi R_p \vec{V}_r$$

- un terme proportionnel à l'accélération du mouvement non uniforme appelé encore terme de « masse apparente »

$$\frac{2}{3} \pi R_p^3 \rho \left(\frac{d\vec{V}_r}{dt} \right)_p$$

- un terme tenant compte des effets visqueux (terme de BASSET) ; il fait apparaître la mémoire du mouvement précédent l'instant t

$$6R_p^2 \sqrt{\pi\rho\mu} \int_{-\infty}^t \left(\frac{d\vec{V}_r}{d\tau} \right)_p \cdot \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} d\tau$$

μ : viscosité cinématique du fluide

- force résultant du gradient de pression statique du fluide environnant. Celui-ci fait apparaître dans l'équation du mouvement du fluide.

$$\left(\frac{d\vec{U}}{dt}\right)_f = -\frac{1}{\rho} \overrightarrow{\text{grad}P} + \nu \Delta \vec{U} \quad \text{avec} \quad \left(\frac{d}{dt}\right)_f = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \overrightarrow{\text{grad}}$$

Annexe 10 : L'holographie

L'holographie est une méthode optique reconnue permettant d'enregistrer le « relief » d'un objet sur une plaque photosensible et de reconstruire cet objet en 3D.

Elle consiste à superposer une onde cohérente de référence à la lumière diffractée par un objet. Cela permet l'enregistrement de la phase et de l'onde de l'objet sur un capteur uniquement sensible à l'intensité. Dans ce paragraphe, nous allons rappeler les trois étapes principales de l'holographie optique :

- enregistrement,
- développement,
- restitution.

Enregistrement

Une onde lumineuse éclairant un objet va être diffusée par celui-ci. L'onde diffusée contient, dans sa phase, une information tridimensionnelle sur l'objet. Dans les systèmes de vision classiques, les capteurs enregistrent l'intensité de l'onde provenant de l'objet, l'information de phase est perdue. Par contre en holographie, comme nous allons le voir dans ce qui suit, la phase de l'onde issue de l'objet est enregistrée sur un hologramme.

En holographie optique, l'onde issue de l'objet \underline{O} interfère avec une onde de référence \underline{R} .

Soit φ la phase de l'onde émise par l'objet et φ_R la phase de l'onde de référence, l'expression de \underline{O} est alors :

$$\underline{O} = Ae^{j\varphi} \text{ et } \underline{R} = A_R e^{j\varphi_R} \quad (4.11)$$

L'amplitude totale résultant de l'interférence de ces deux ondes est :

$$\underline{a} = \underline{O} + \underline{R} = Ae^{j\varphi} + A_R e^{j\varphi_R} \quad (4.12).$$

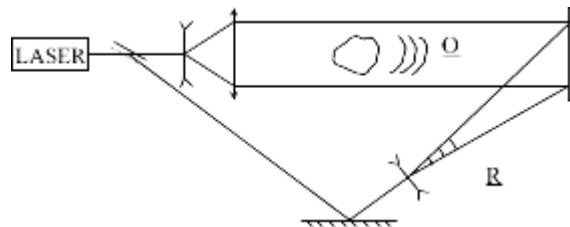


Figure A10- 1 : Schéma de principe d'enregistrement d'un hologramme.

Le capteur photosensible enregistre l'intensité de l'onde résultante :

$$I = \underline{a} \underline{a}^* = |\underline{O}|^2 + |\underline{R}|^2 + \underline{O} \underline{R}^* + \underline{R} \underline{O}^* = A^2 + A_R^2 + 2AA_R \cos(\varphi - \varphi_R) \quad (4.13)$$

L'information de position de l'objet, contenue dans sa phase, est enregistrée sur une plaque photographique sous la forme de franges associées au terme $\cos(\varphi - \varphi_R)$.

Développement

Les plaques holographiques sont constituées de bromure d'argent. Sous l'action de la lumière, l'ion argent passe sous forme d'atome d'argent mais l'image n'est pas perceptible. Il faut amplifier la quantité d'ion argent pour que le contraste apparaisse entre les zones éclairées et les zones non-éclairées. Il s'agit de l'étape de développement.

En considérant que cette étape est linéaire, c'est-à-dire que la transmittance de la plaque après développement est une fonction linéaire de l'intensité reçue pendant l'exposition, la transmittance t_f du film après développement a pour expression :

$$t_f = t_b + \beta' \left(|\underline{Q}|^2 + \underline{O}\underline{R}^* + \underline{R}\underline{O}^* \right) \quad (4.14)$$

où t_b est la transmittance moyenne uniforme produite par l'onde de référence et β' un coefficient de proportionnalité dépendant des paramètres de développement de la plaque et de ses caractéristiques.

Restitution

Elle consiste à restituer toute l'information contenue dans l'onde objet enregistrée. La restitution optique se fait par rééclairage de l'hologramme développé par la même onde de référence \underline{R} que celle utilisée à l'enregistrement. La lumière transmise par la plaque holographique a pour expression :

$$t_f \underline{R} = t_b \underline{R} + \beta' \left(|\underline{Q}|^2 \underline{R} + \underline{O}\underline{R}^* \underline{R} + \underline{R}\underline{O}^* \underline{R} \right) = \left(\underline{R}t_b + \beta' \underline{R} |\underline{Q}|^2 \underline{Q} + \beta' \underline{R}^2 \underline{O}^* \right) \quad (4.15)$$

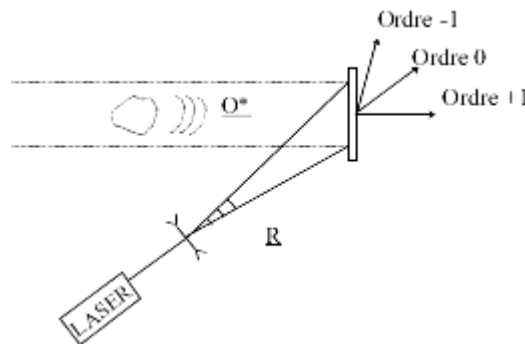


Figure A10- 2 : Schéma de principe de restitution d'un hologramme.

Analysons les différents termes de cette expression :

- le premier terme est une réplique de l'onde de référence atténuée par la partie continue de la transmittance (t_b),
- le second terme correspond à l'enveloppe de la diffraction de l'objet,
- l'intensité de l'onde de référence $|R|^2$ étant uniforme, le troisième terme de l'équation est, à une constante multiplicative près, une réplique exacte de l'onde objet O : c'est l'image réelle,
- le quatrième terme de l'équation contient l'information de l'onde objet conjuguée O^* .
Un expérimentateur placé en arrière de l'hologramme observera cette onde comme provenant d'une image virtuelle, située à la place de l'objet.

Les franges d'interférence se comportent en réalité comme un réseau de diffraction, l'image réelle correspond à l'ordre -1 de diffraction, l'image virtuelle à l'ordre +1 et la lumière non diffractée par le réseau à l'ordre 0 (Figure A10- 2).

Les différents montages holographiques

L'enregistrement des interférences entre une onde de référence et une onde objet peut être réalisé par différents montages d'enregistrement listés ci-dessous :

- le montage à référence inclinée (Figure A10- 1),
- le montage en ligne (Figure A10- 3), dans celui-ci, l'onde de référence est égale à l'onde qui éclaire l'objet et l'onde objet est la lumière diffractée par la section opaque de l'objet,
- Le montage en ligne à deux bras (Figure A10- 4).

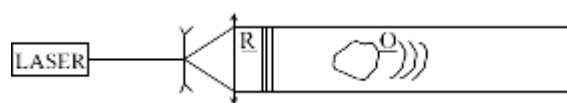


Figure A10- 3 : Schéma du montage d'enregistrement en ligne.

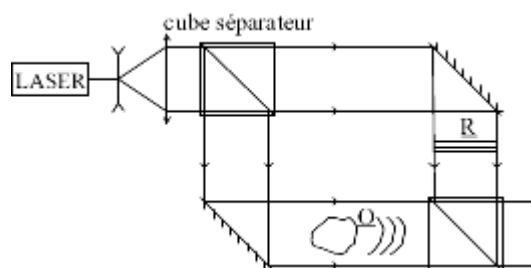


Figure A10- 4 : Schéma du montage d'enregistrement sans inclinaison du faisceau mais à deux bras (mesure et référence).

Dans tous ces montages, on observe l'onde transmise par l'objet, mais il est également possible de travailler en réflexion ou en diffusion du faisceau laser par l'objet. Un exemple du montage à référence non inclinée à deux bras enregistrant les interférences entre la lumière diffusée à 90° par l'objet O et l'onde de référence R est donné Figure A10- 5.

Les montages à deux bras, bien que plus compliqués expérimentalement, permettent de régler l'intensité de l'onde de référence par rapport à celle de l'onde objet et donc d'améliorer le contraste des franges d'interférences.

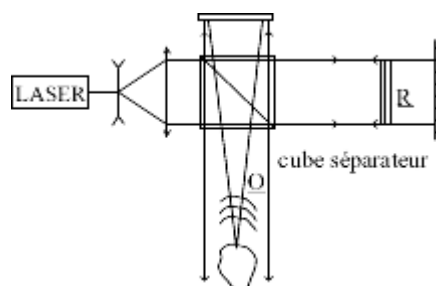


Figure A10- 5 : Montage à référence non inclinée à deux bras.

L'holographie Numérique

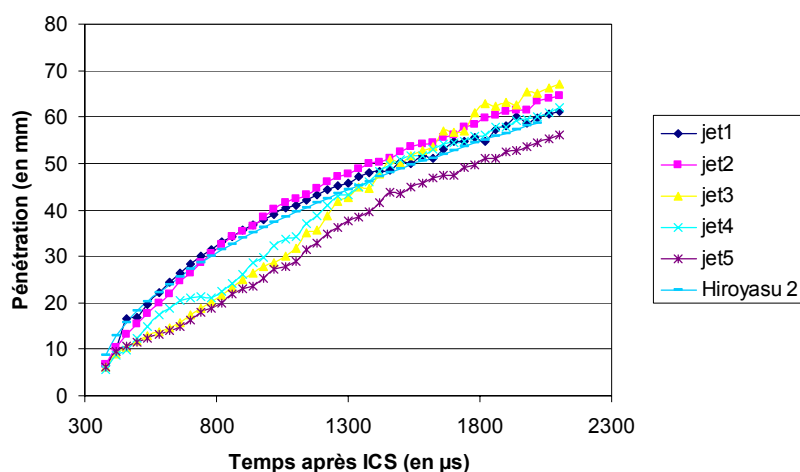
L'holographie optique est peu utilisée dans l'industrie pour des raisons pratiques. En effet, l'enregistrement et le développement de la plaque holographique sont des opérations délicates. L'étape de restitution nécessite un montage de déplacement mécanique de l'hologramme avec rééclairage de celui-ci par le faisceau de référence et enregistrement sur une caméra de chaque image restituée pour obtenir le volume de l'objet. Par contre, l'holographie numérique offre de nouvelles possibilités. L'holographie numérique s'appuie sur l'holographie optique pour l'étape d'enregistrement. La phase de développement n'existe plus, l'expression numérique (4.14) est incluse dans la phase de restitution où l'hologramme n'est plus rééclairé mais traité numériquement comme nous l'exposerons dans le chapitre 4. Cependant l'un des inconvénients majeurs de l'holographie numérique est la faible résolution des capteurs numériques (50 fois plus petite que les plaques holographiques). Les techniques de traitement d'images doivent être optimales pour permettre de compenser en partie cette faible résolution.

Annexe 11 : Résultats complémentaires pour la pénétration et l'angle d'ouverture

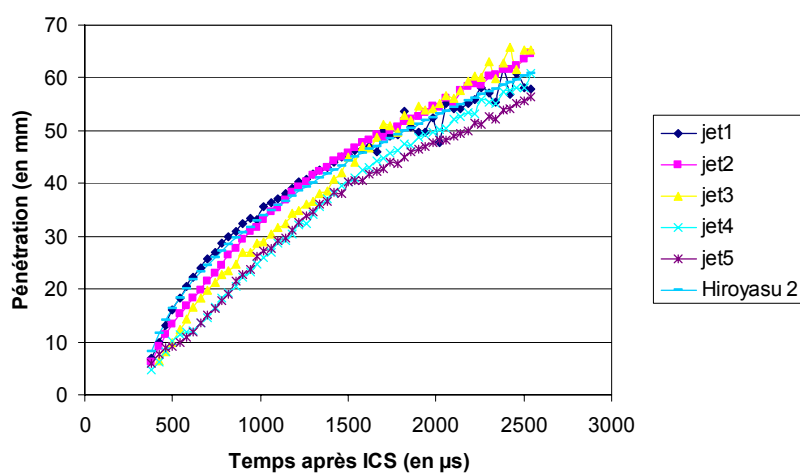
Cette annexe présente les résultats des mesures de pénétration et angle pour l'injecteur 1 et 2 à différentes pressions d'injections et contre pression. Nous avons également représenté la correction de la prédiction de Hiroyasu pour la pénétration et les prédictions d'Hiroyasu et de Reitz – Bracco pour l'angle.

Pénétration

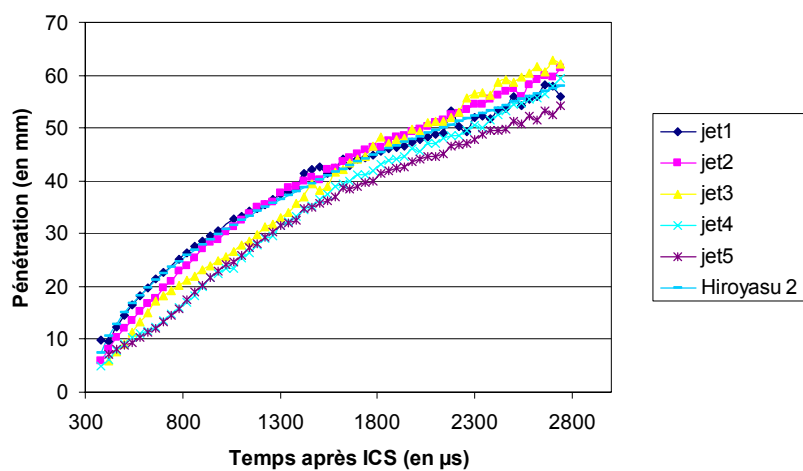
Injecteur 1



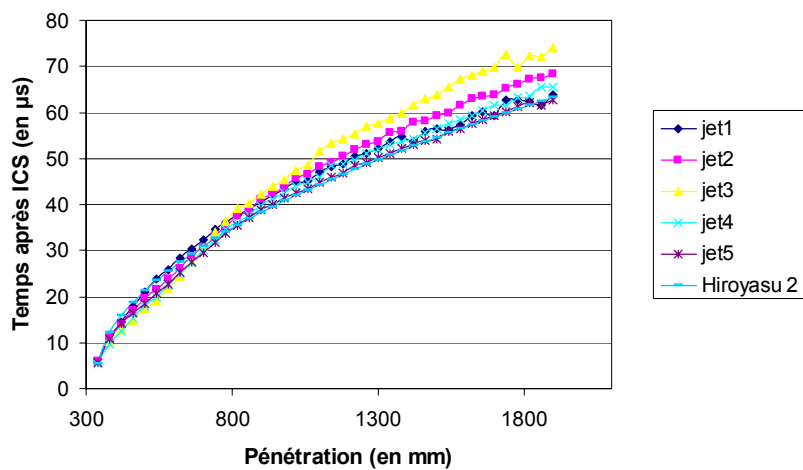
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).



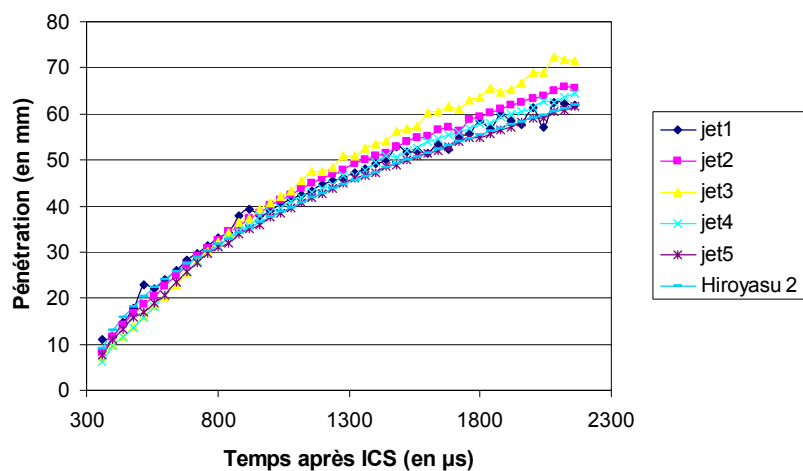
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 3.5 MPa).



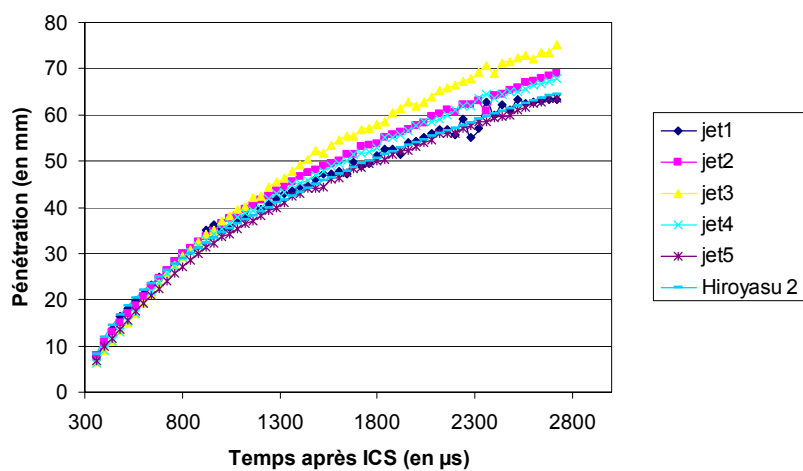
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (P_{inj} : 80 MPa, CP : 5 MPa).



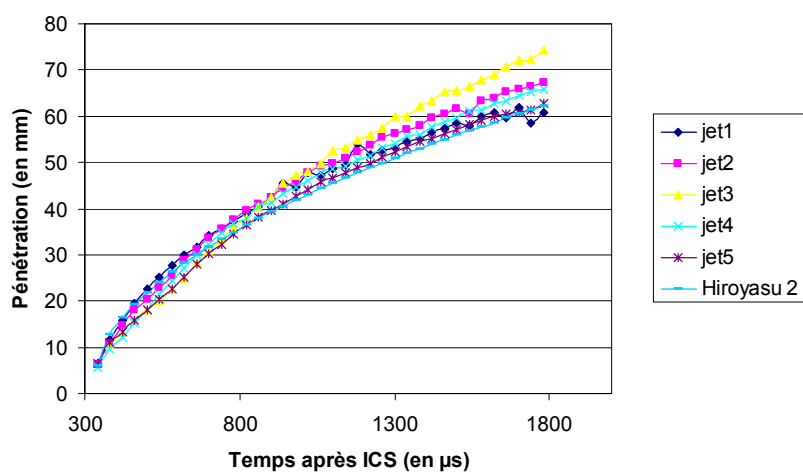
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).



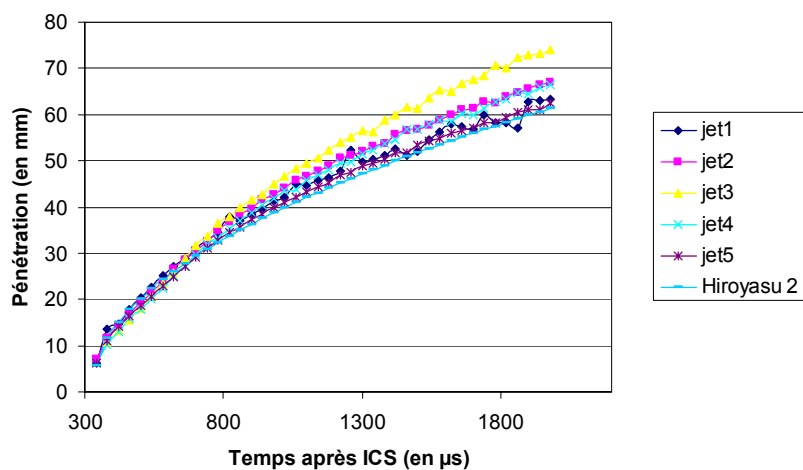
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (P_{inj} : 120 MPa, CP : 3.5 MPa).



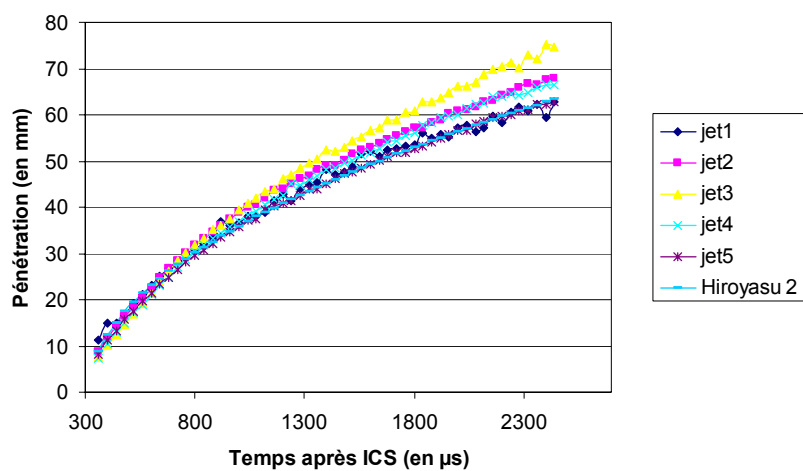
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 120 MPa, CP : 5 MPa).



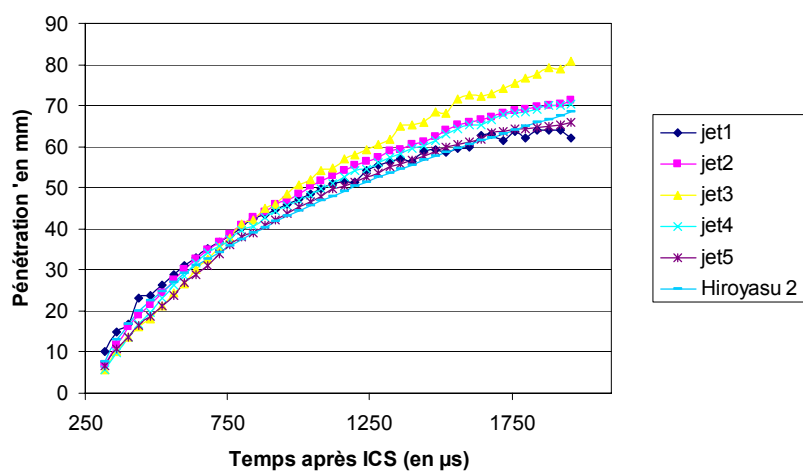
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 140 MPa, CP : 2.5 MPa).



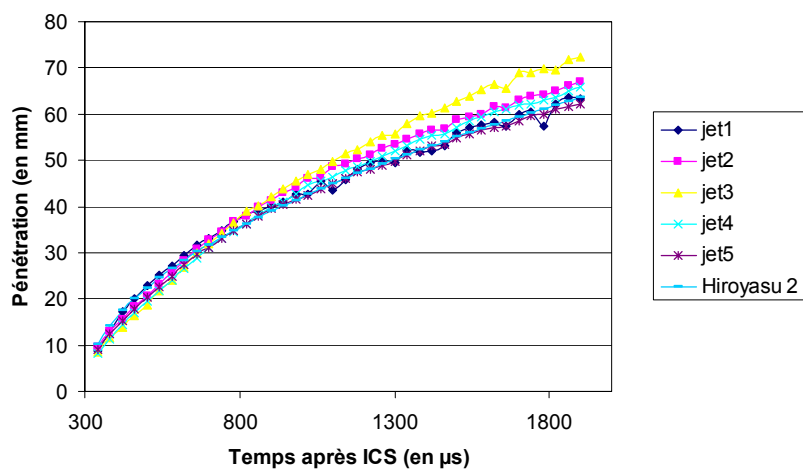
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 140 MPa, CP : 3.5 MPa).



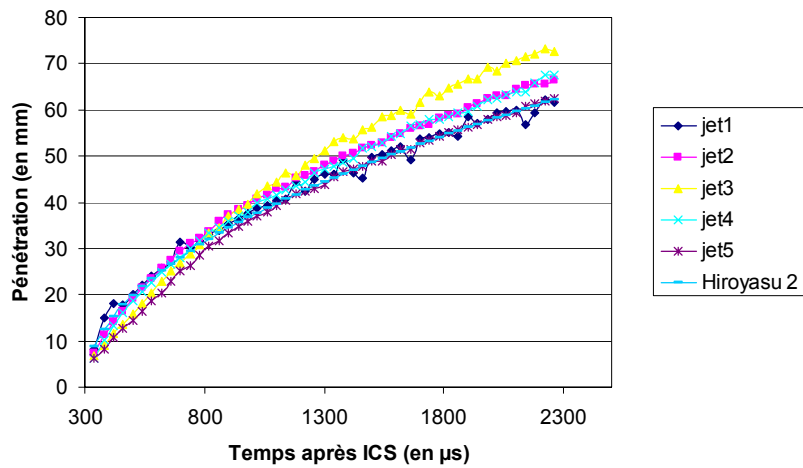
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 140 MPa, CP : 5 MPa).



Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 160 MPa, CP : 2.5 MPa).

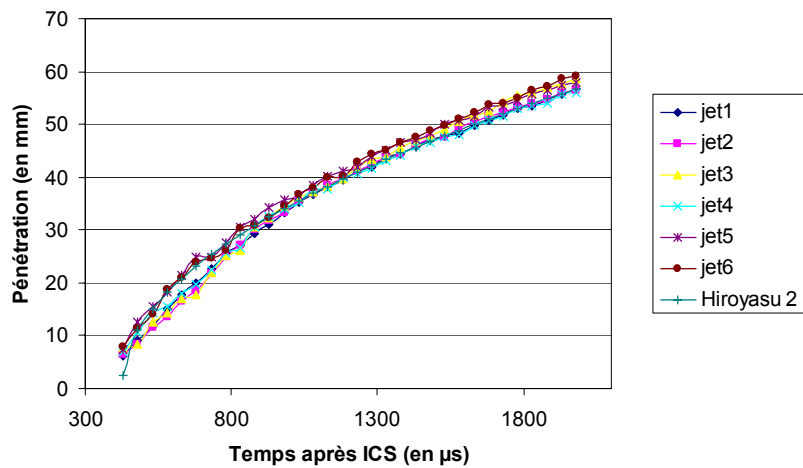


Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (Pinj : 160 MPa, CP : 3.5 MPa).

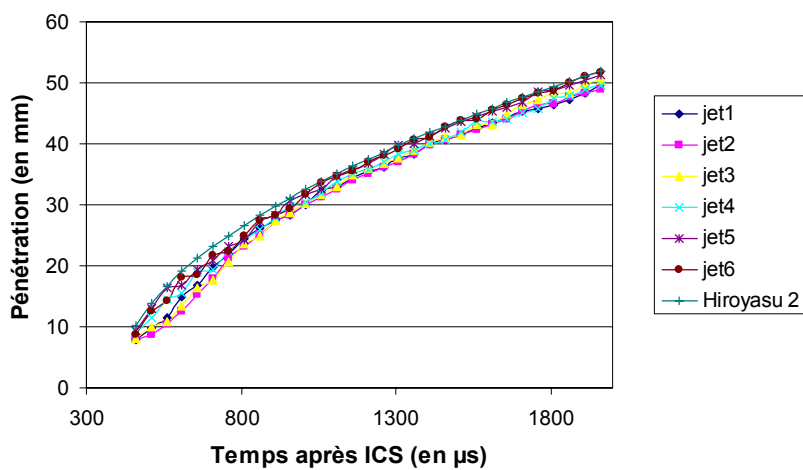


Evolution de la pénétration pour l'injecteur 1 (P_{inj} : 160 MPa, CP : 5 MPa).

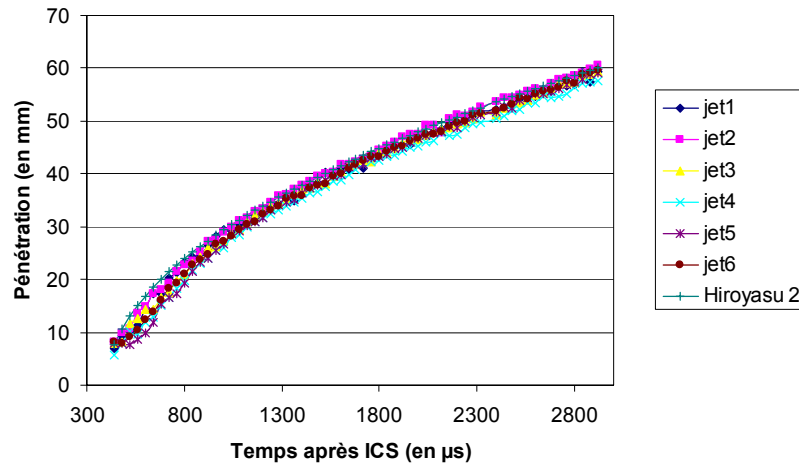
Injecteur 2 :



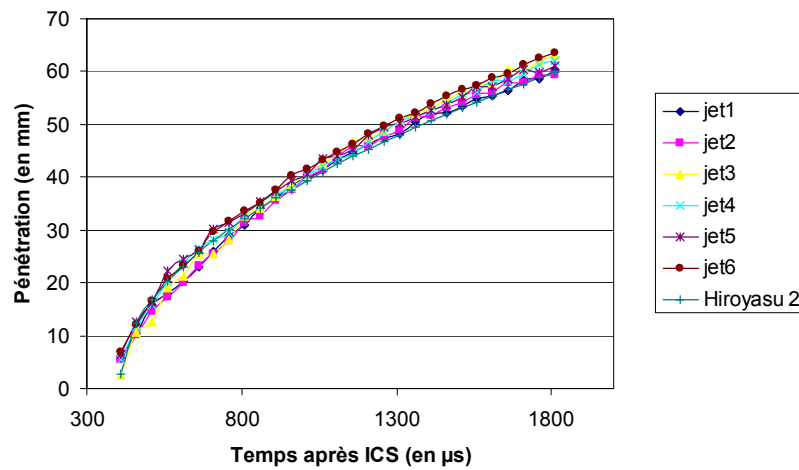
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).



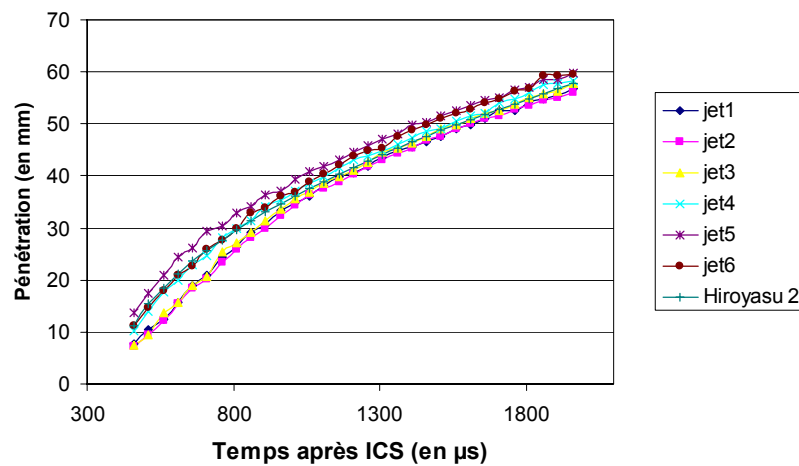
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 80 MPa, CP : 3.5 MPa).



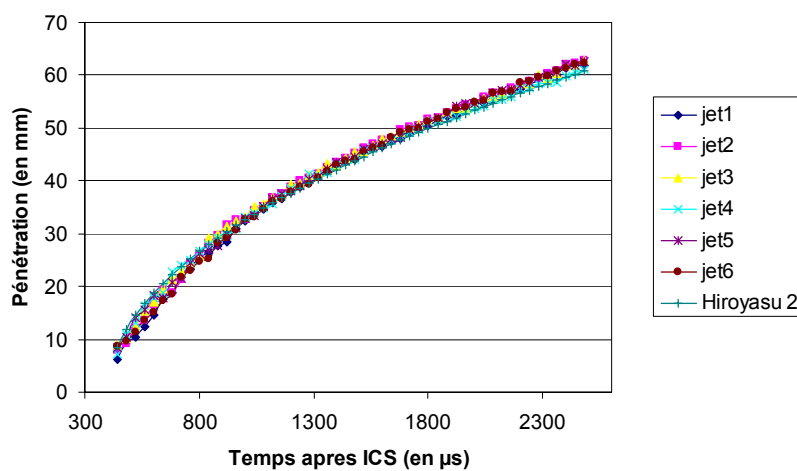
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 80 MPa, CP : 5 MPa).



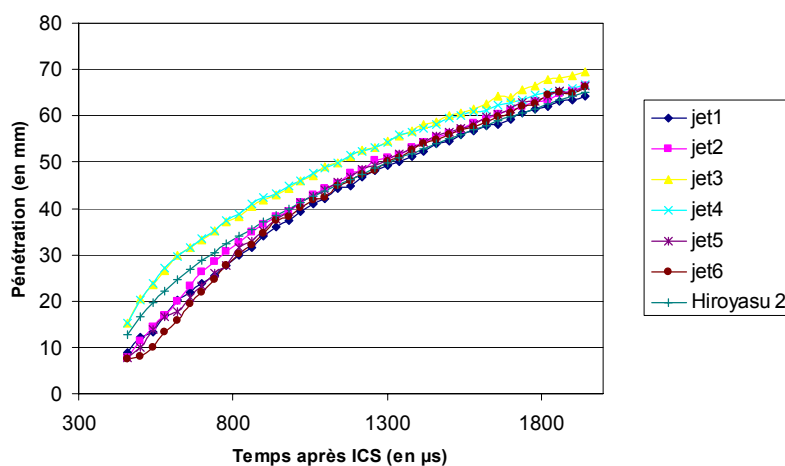
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).



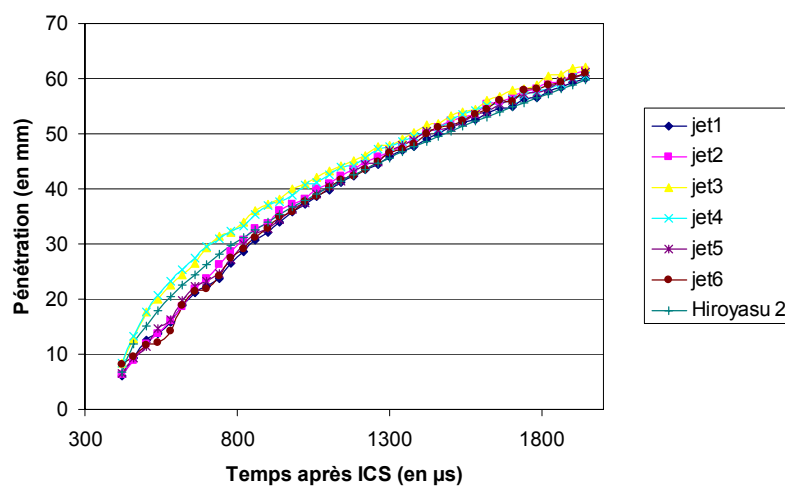
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 120 MPa, CP : 3.5 MPa).



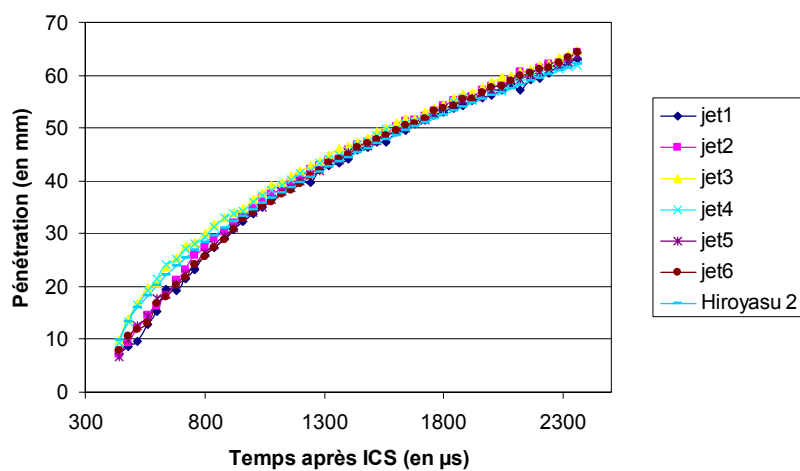
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 120 MPa, CP : 5 MPa).



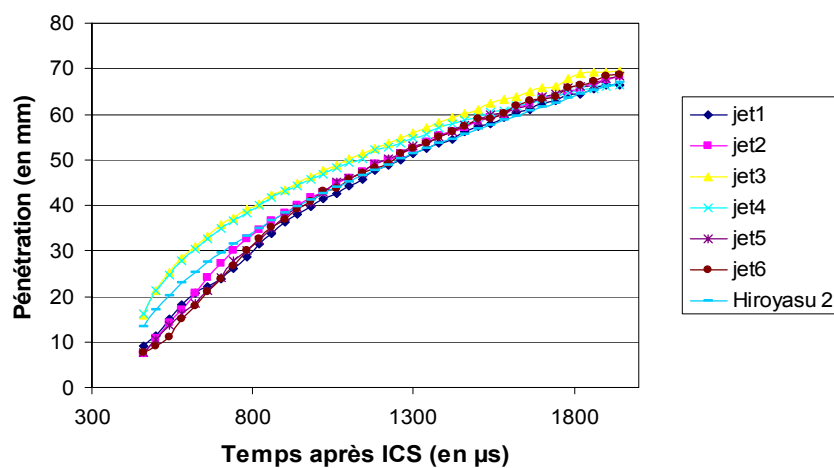
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 140 MPa, CP : 2.5 MPa).



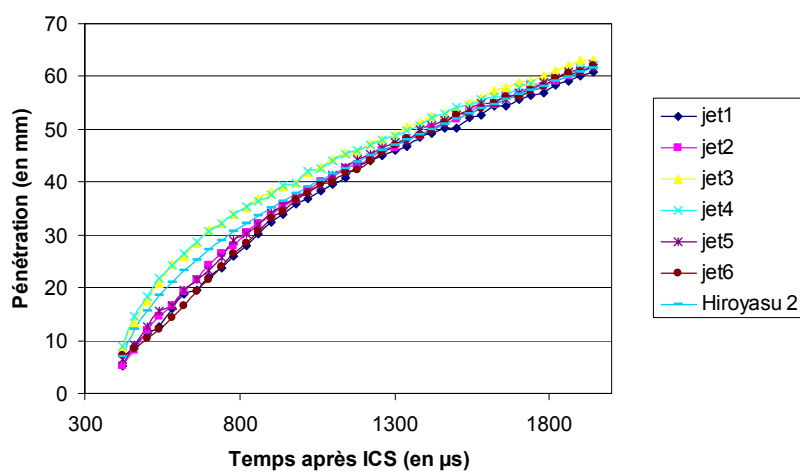
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 140 MPa, CP : 3.5 MPa).



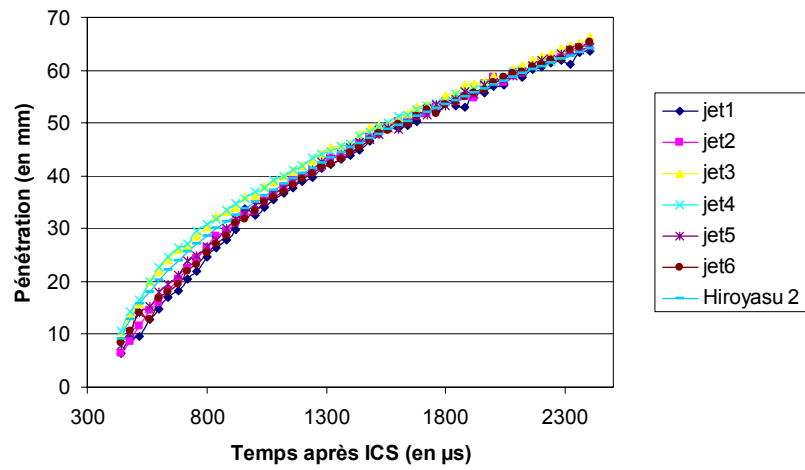
Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (Pinj : 140 MPa, CP : 5 MPa).



Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (Pinj : 160 MPa, CP : 2.5 MPa).

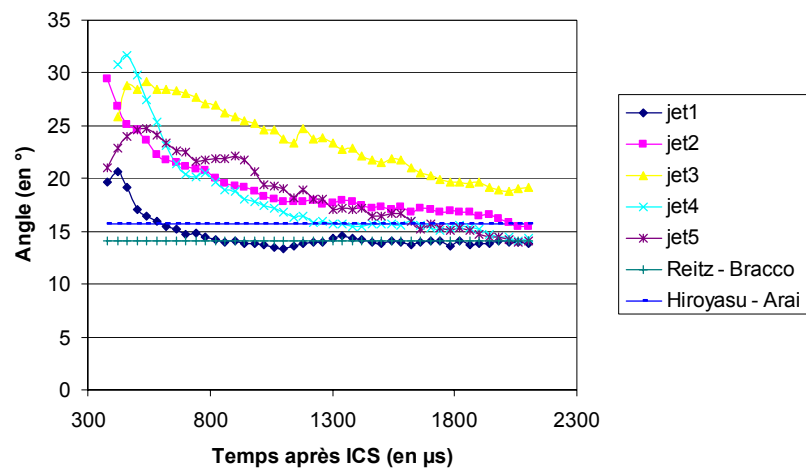


Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (Pinj : 160 MPa, CP : 3.5 MPa).

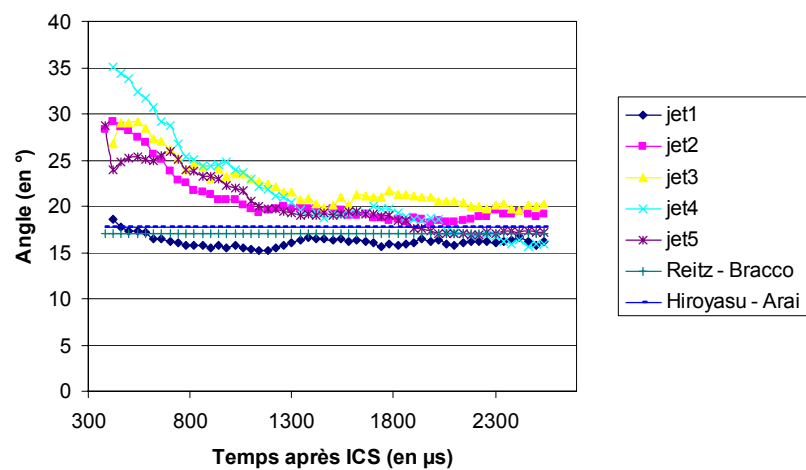


Evolution de la pénétration pour l'injecteur 2 (Pinj : 160 MPa, CP : 5 MPa).

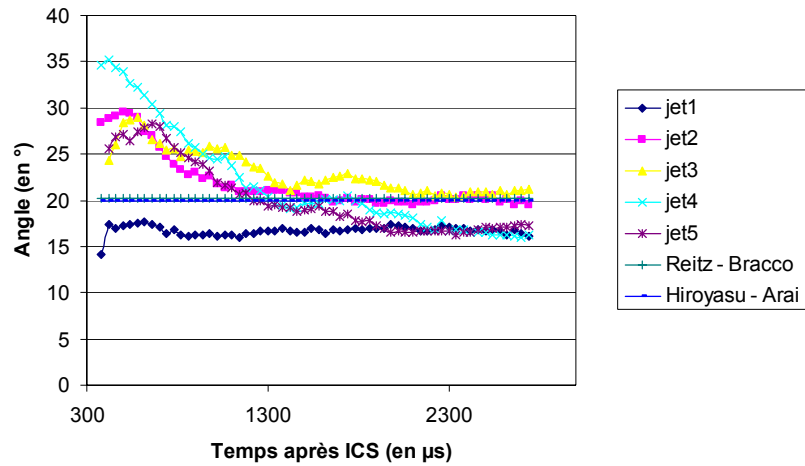
Angle Injecteur 1



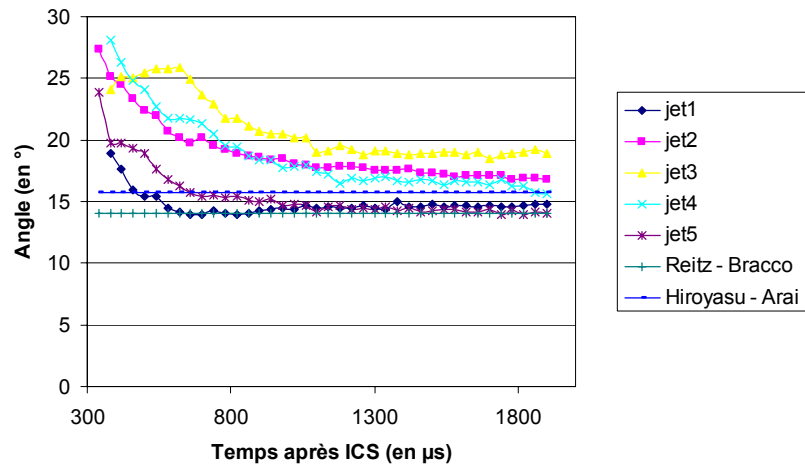
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).



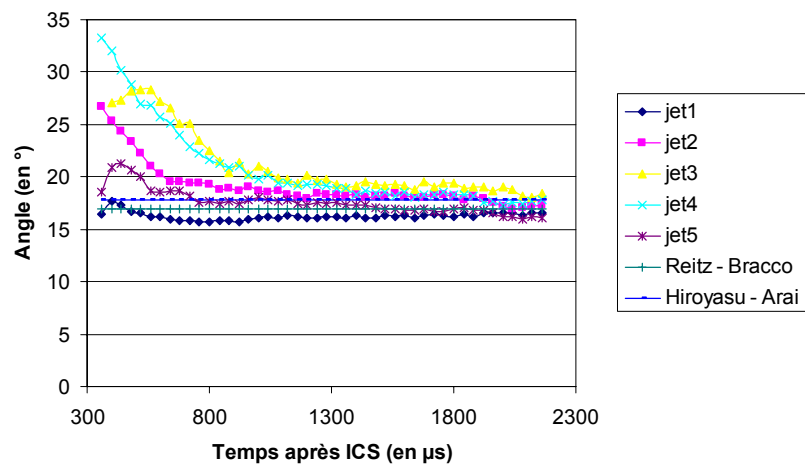
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 3.5 MPa).



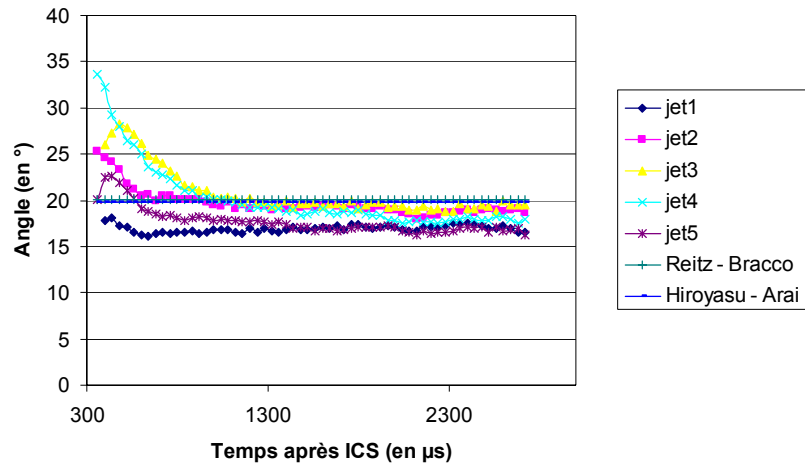
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 80 MPa, CP : 5 MPa).



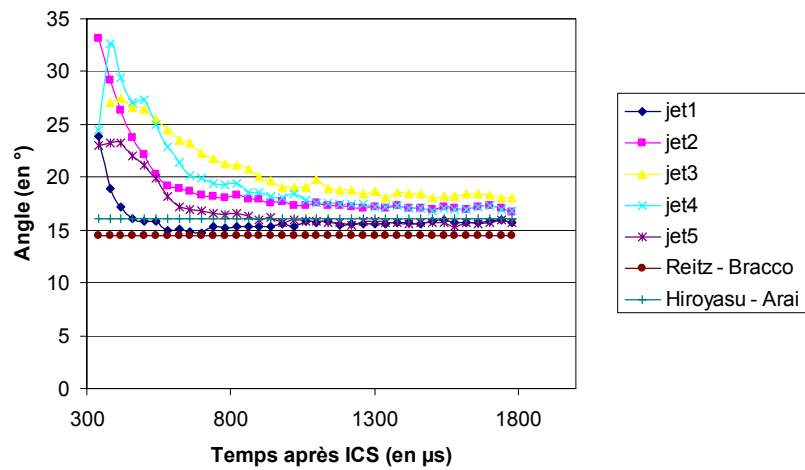
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).



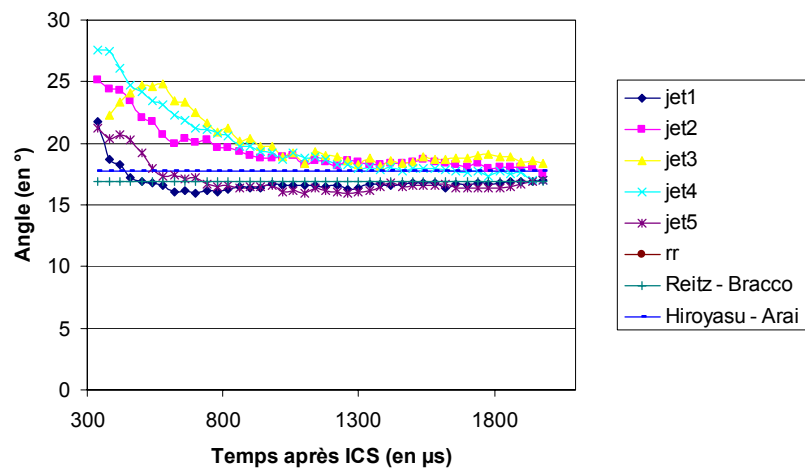
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 120 MPa, CP : 3.5 MPa).



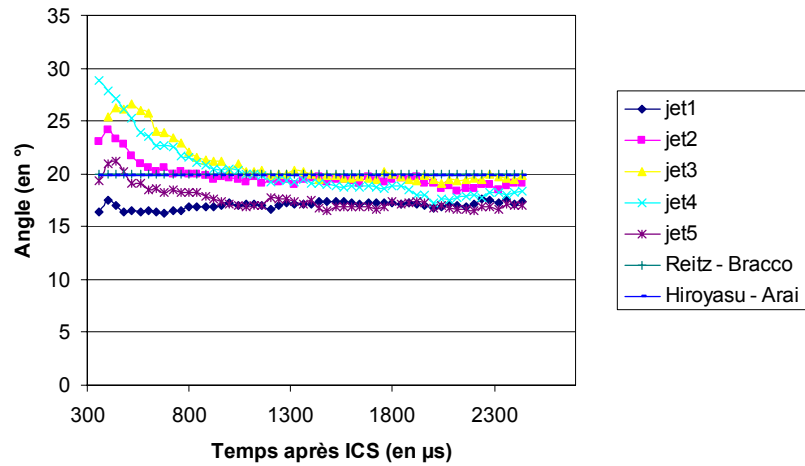
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 120 MPa, CP : 5 MPa).



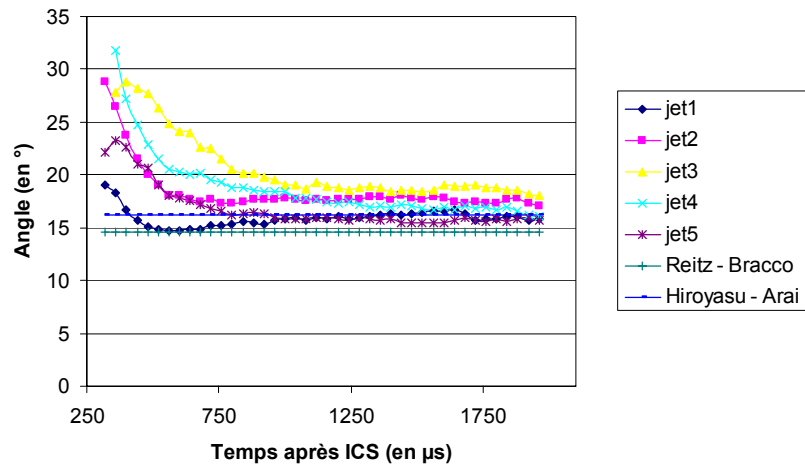
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 140 MPa, CP : 2.5 MPa).



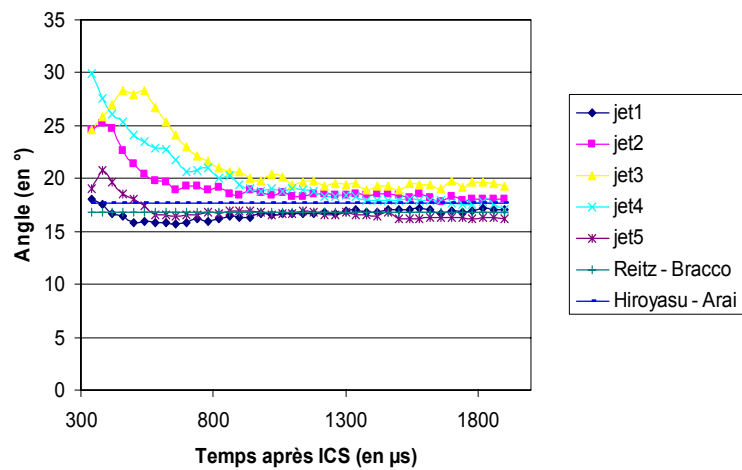
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 140 MPa, CP : 3.5 MPa).



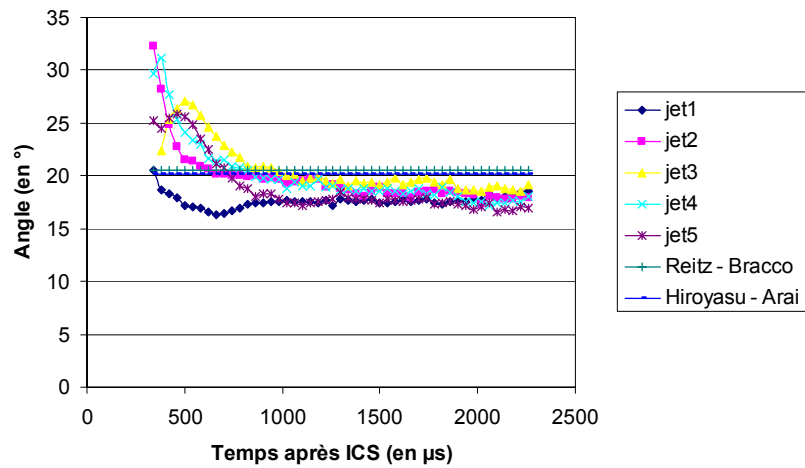
Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 140 MPa, CP : 5 MPa).



Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 160 MPa, CP : 2.5 MPa).

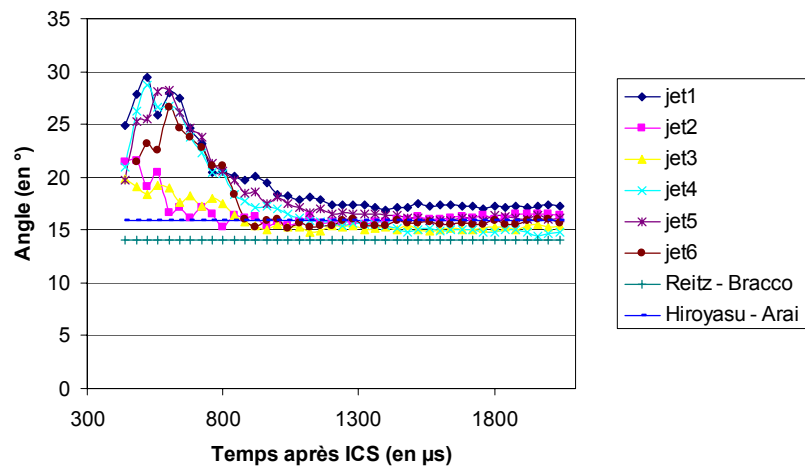


Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 160 MPa, CP : 3.5 MPa).

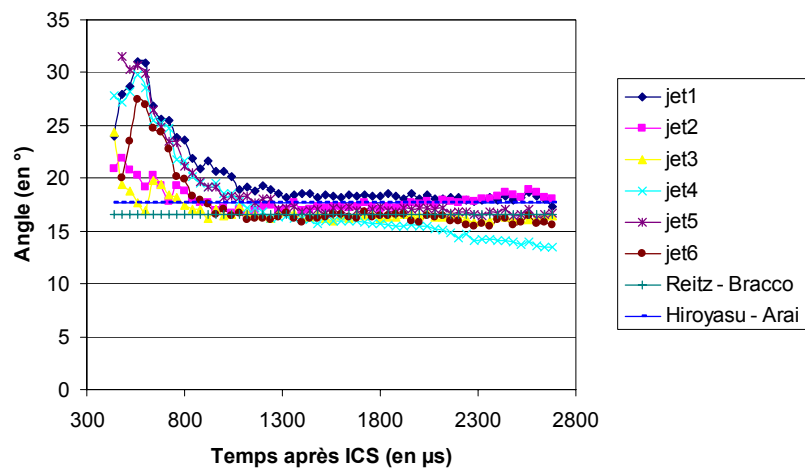


Evolution de l'angle pour l'injecteur 1 (Pinj : 160 MPa, CP : 5 MPa).

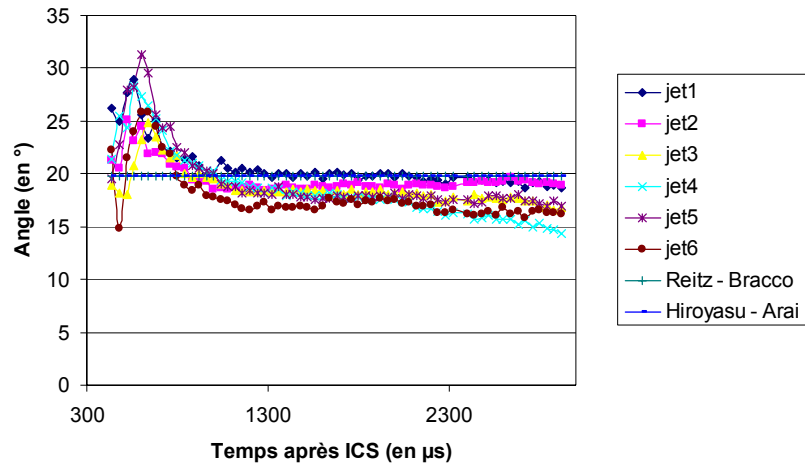
Injecteur 2



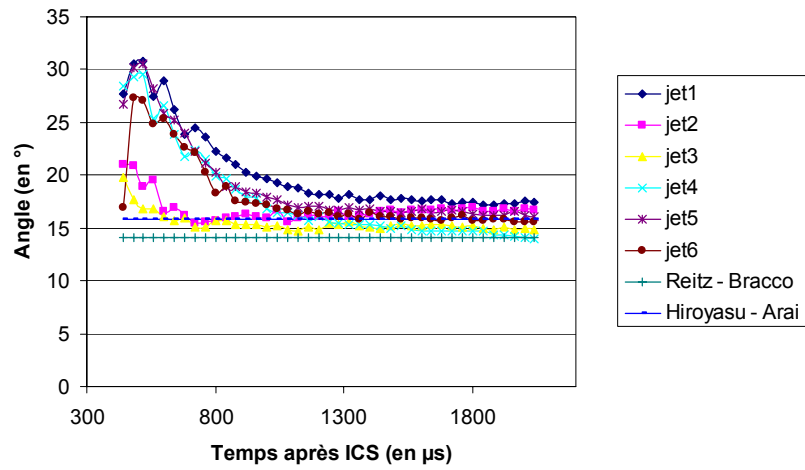
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 2.5 MPa).



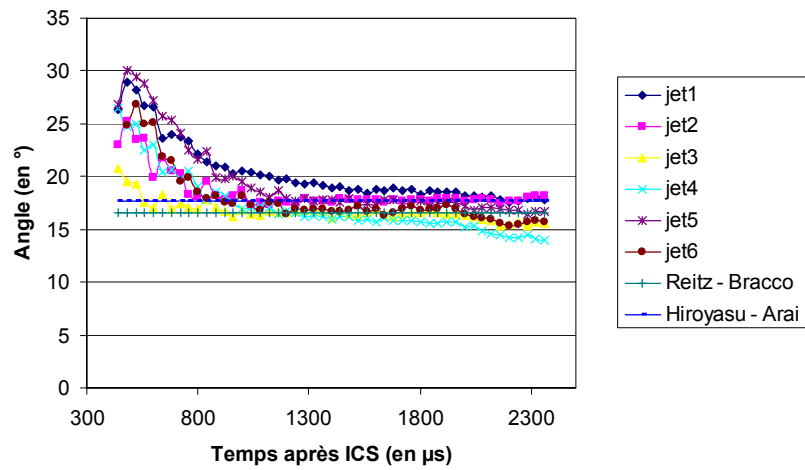
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 3.5 MPa).



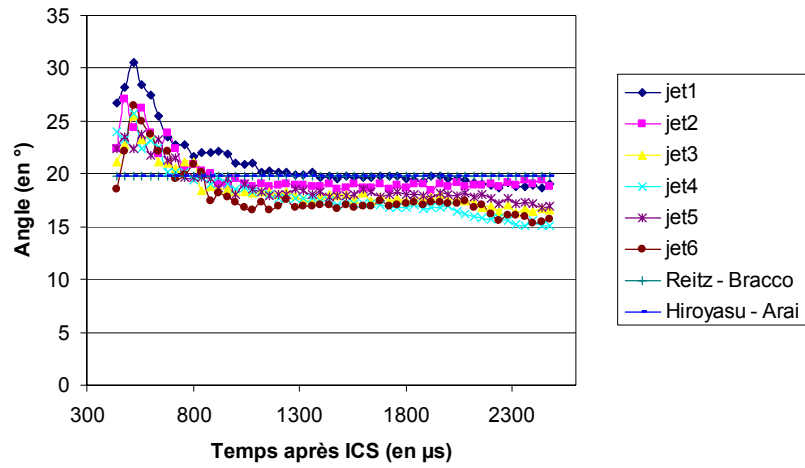
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 80 MPa, CP : 5 MPa).



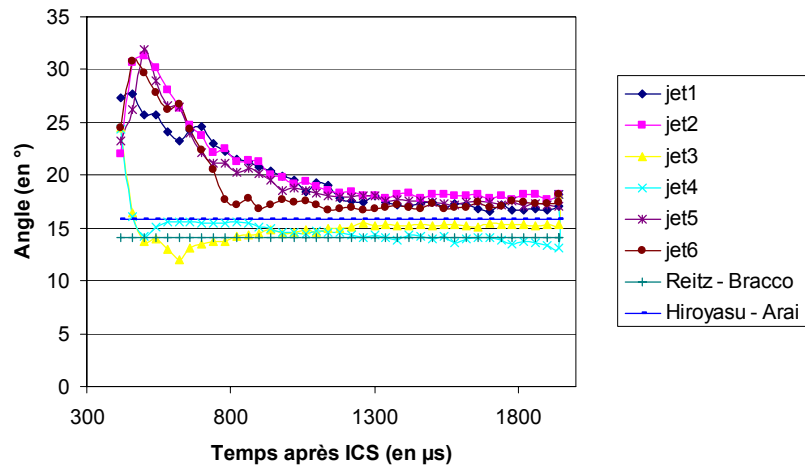
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 2.5 MPa).



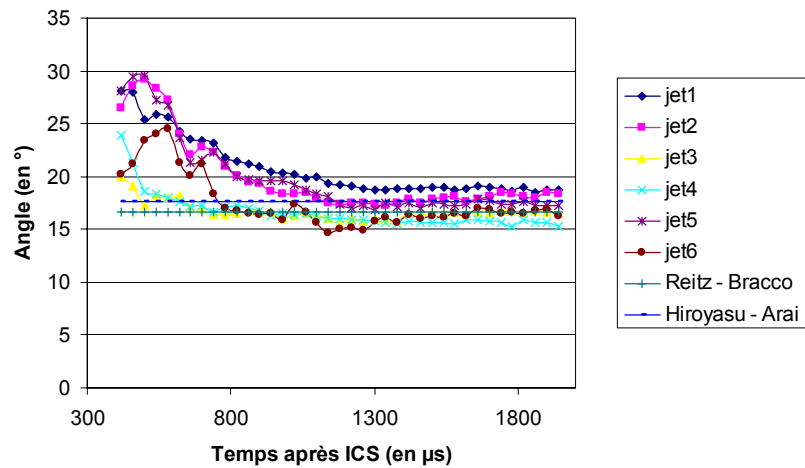
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 120 MPa, CP : 3.5 MPa).



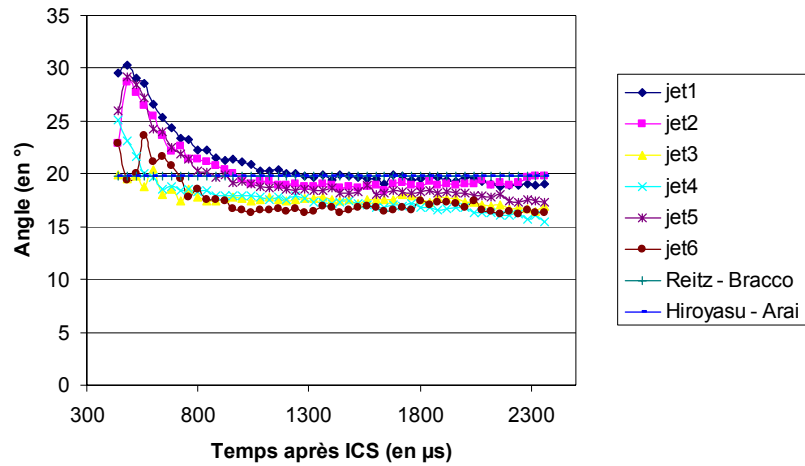
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 120 MPa, CP : 5 MPa).



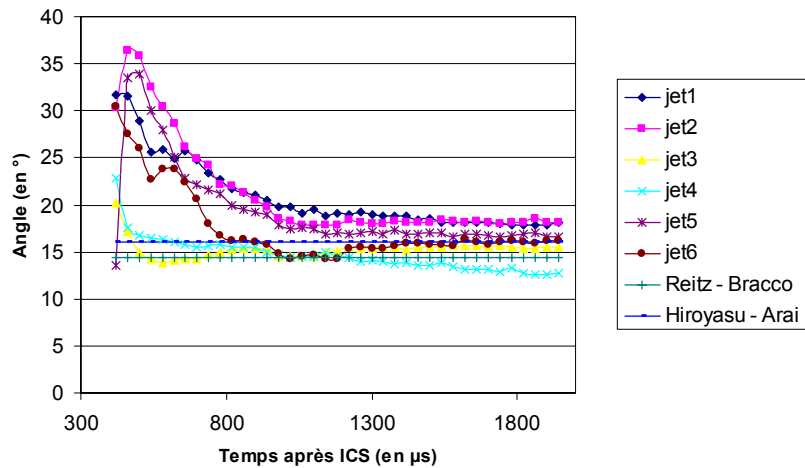
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 140 MPa, CP : 2.5 MPa).



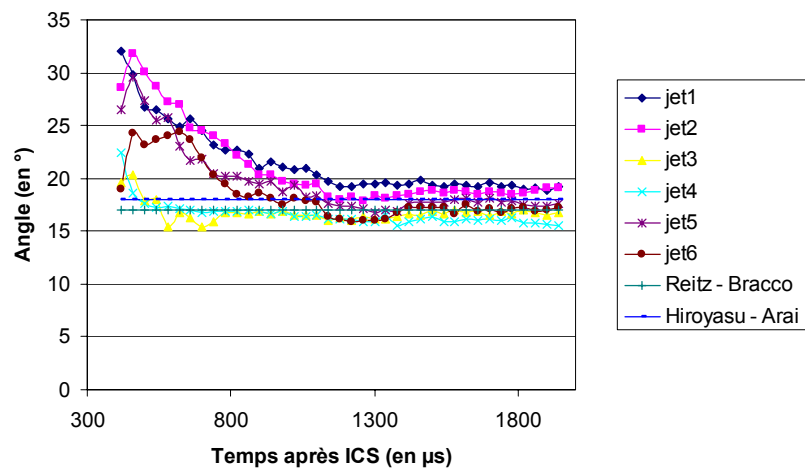
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (P_{inj} : 140 MPa, CP : 3.5 MPa).



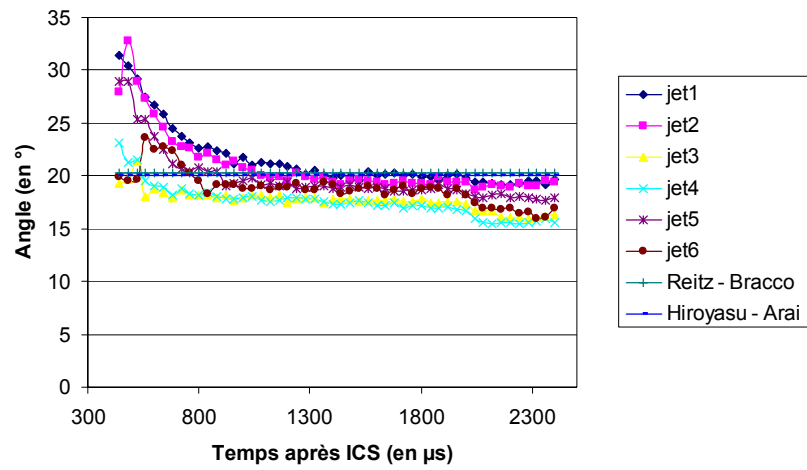
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 140 MPa, CP : 5 MPa).



Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 160 MPa, CP : 2.5 MPa).



Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 160 MPa, CP : 3.5 MPa).



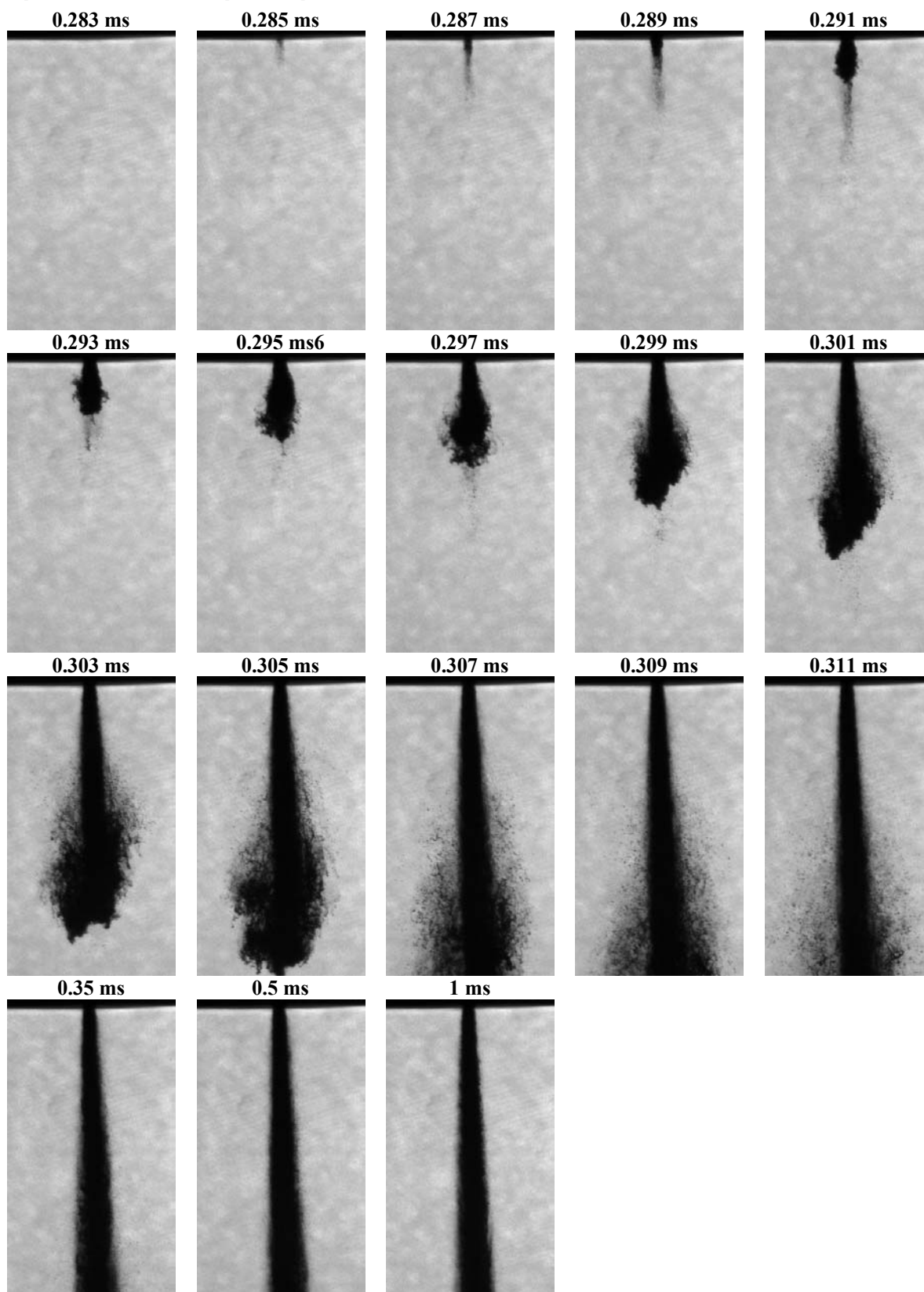
Evolution de l'angle pour l'injecteur 2 (Pinj : 160 MPa, CP : 5 MPa).

Annexe 12 : Résultats microscopiques

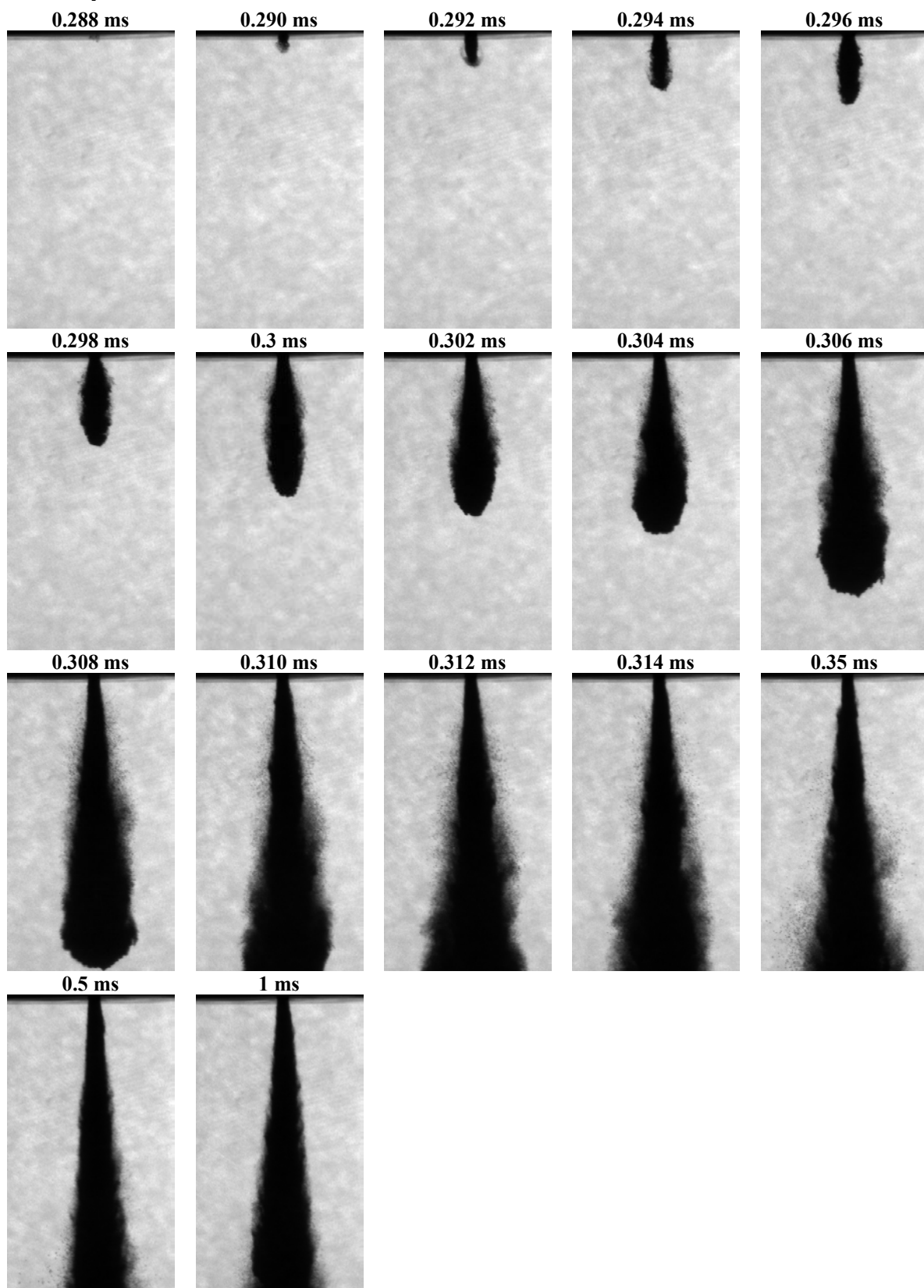
Début d'injection

Injecteur mono trou

A pression atmosphérique

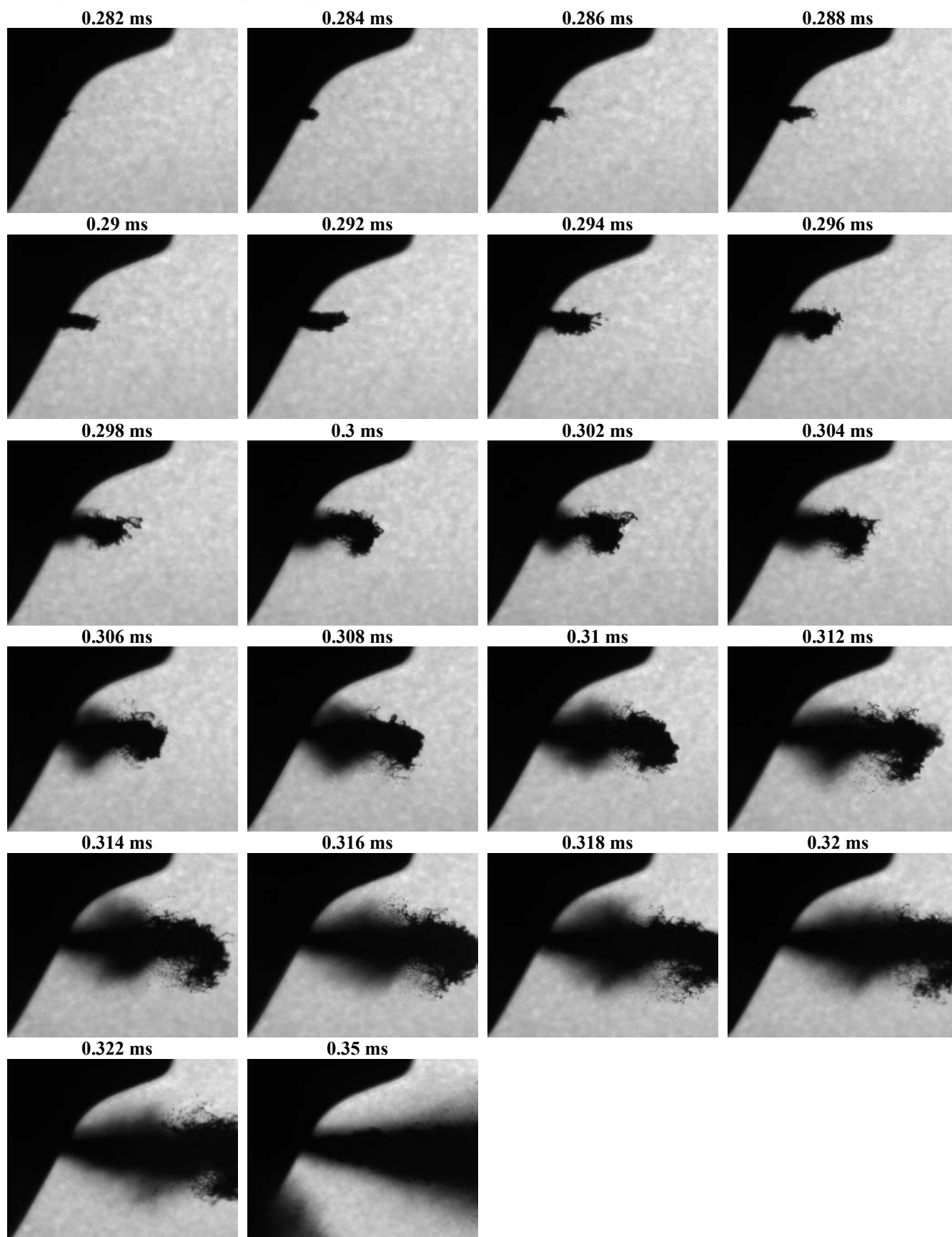


Contre pression 2MPa

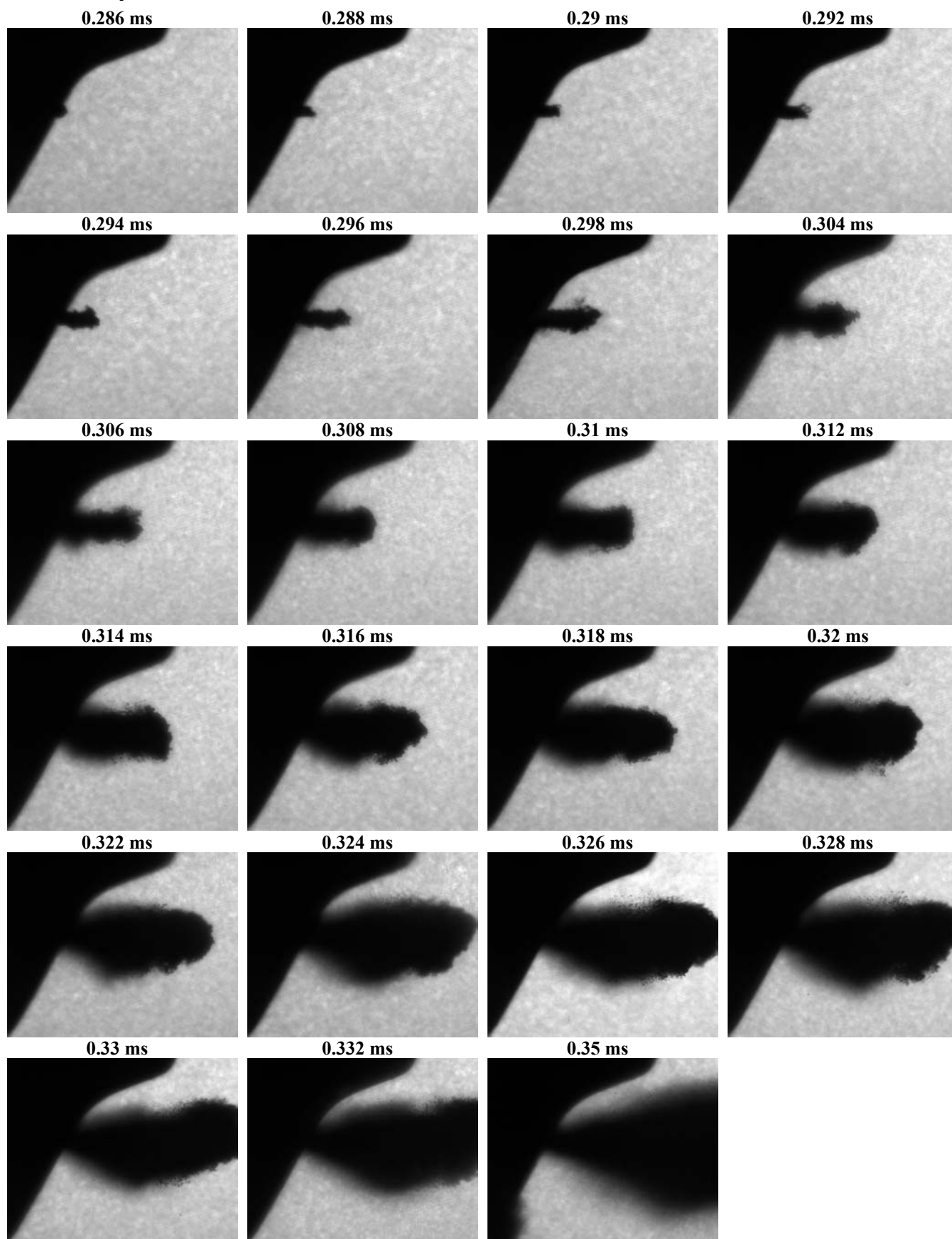


Injecteur multi trou

A pression atmosphérique



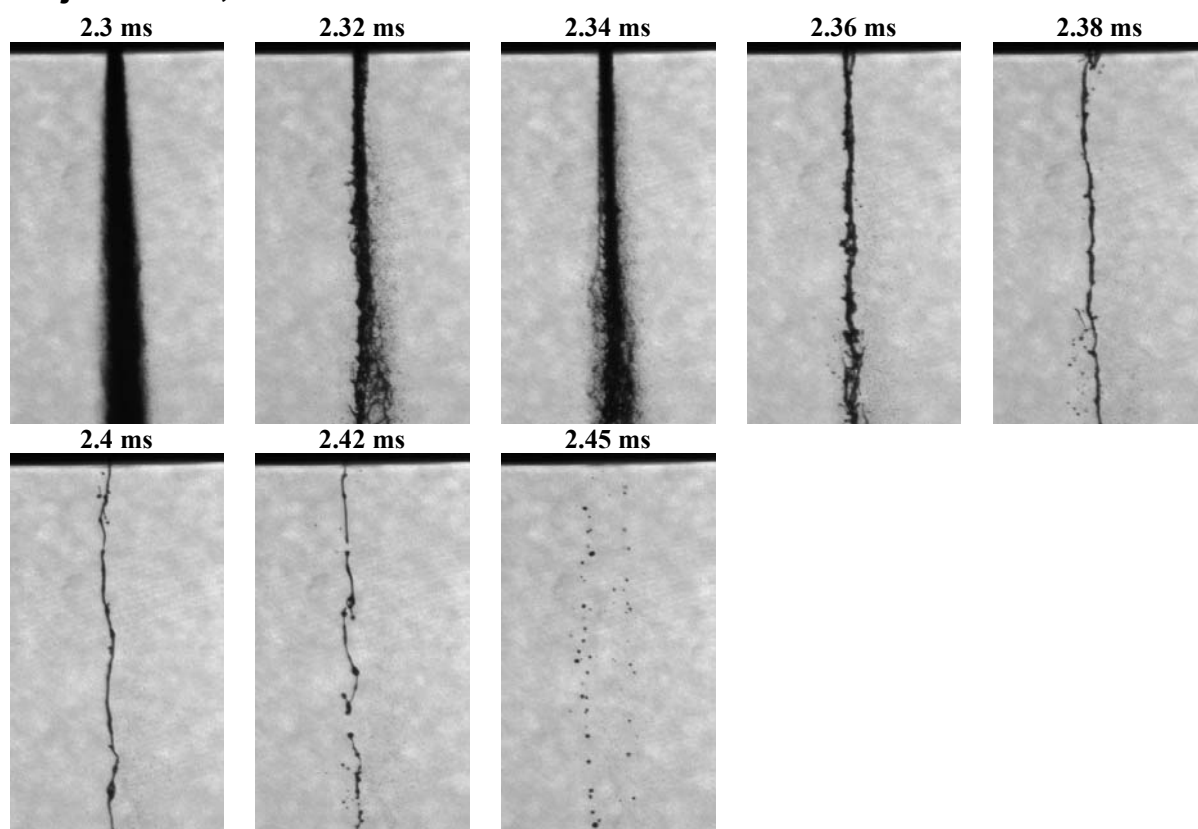
Contre pression 1MPa



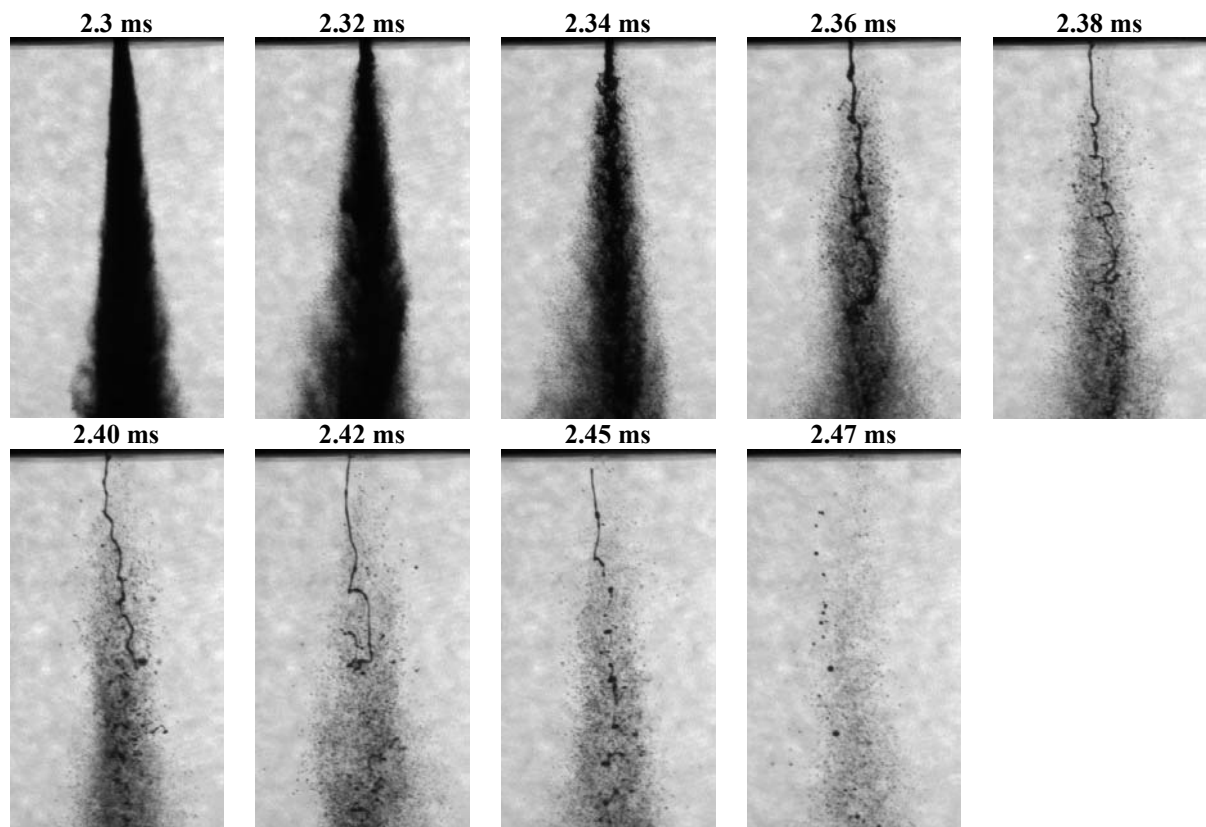
Fin d'injection

Injecteur monotrou

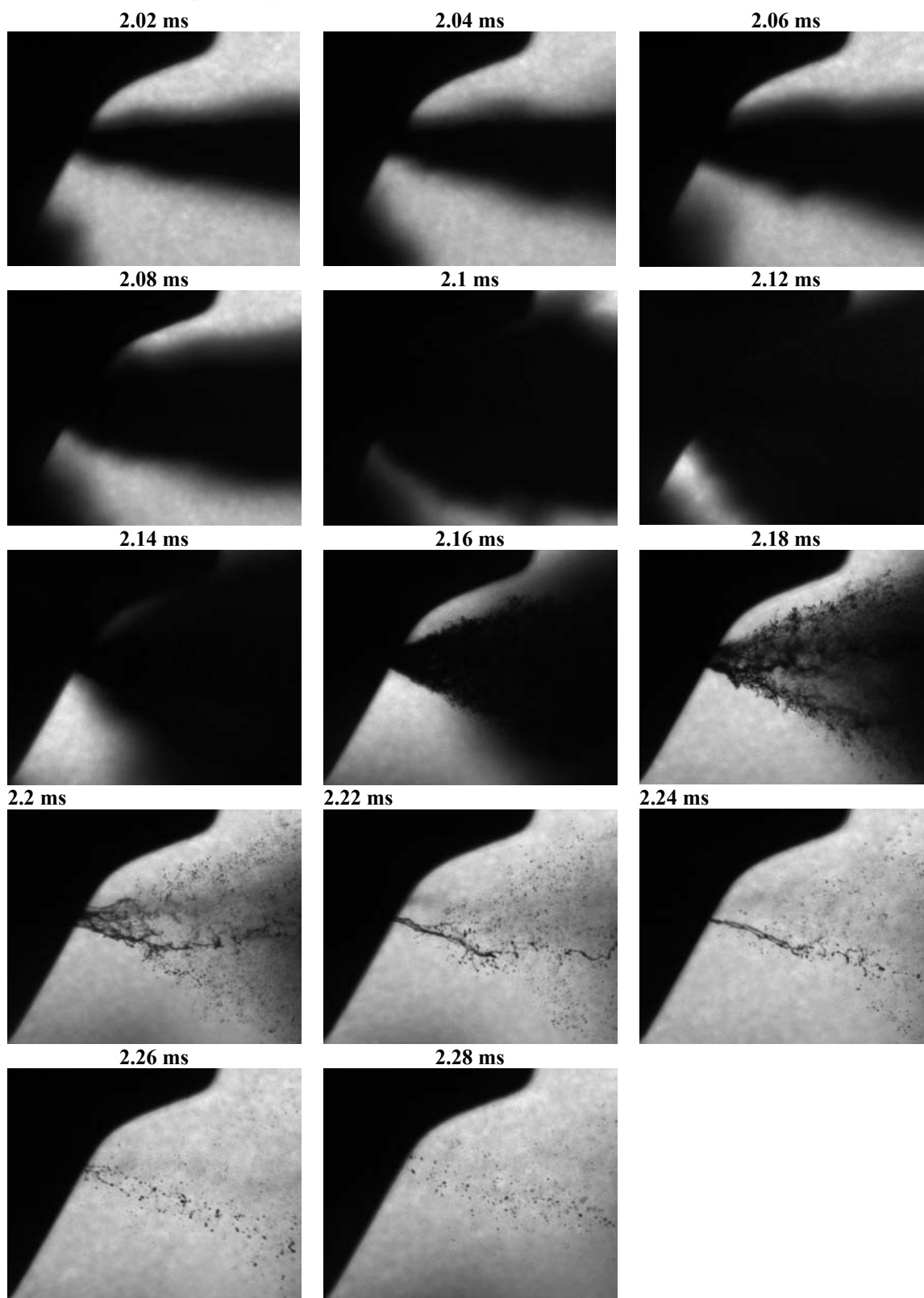
Pinj 120 MPa, CP : 0 MPa



Pinj 120 MPa, CP : 2 MPa



Injecteur Multi trou
Pression atmosphérique



Pression 1 MPa

